Tartalomjegyzék

Beindítjuk a SzürkeÁllományt!
Elméleti keretek
Keretezzünk elméletekkel I: A vak órásmester
Keretezzünk elméletekkel II: A szerveződési szintek fogalma
Mi az az idegtudomány?
Keretezzünk elméletekkel II: Az Emergencia fogalma
Miről nem beszélünk
Állandó, Változó, változó állandóság és állandó változás: a Homeosztázis fogalma I.
Állandó, Változó, változó állandóság és állandó változás. A Homeosztázis fogalma II.
A korai evolúció és a többsejtűek kialakulása
Hogyan alakulnak ki új funkciókat megvalósító rendszerek (gének, sejtek, szervek)?
A biofilmek ragadós trutyijától a bukfencező hidráig
Köpönyegből messzelátó, az idegsejt és a környezetre adott válasz feltalálása
Hogyan látják az idegsejtek a világot? A kódolás trükkjei.
A legalapabb alapok: A jeláramlás lépései az idegsejtekben
Tengerből jöttünk és tengervízből vagyunk: a membránfeszültség kialakulása az idegsejtekben.
Merre húzzák K+ovácsék a kötelet:? A szinaptikus áramok és az akciós potenciálok kialakulása
Kvadrillió mikroerősítő az agyban: a szinapszis
Jelterjedés és jelösszegződés az idegsejtekben
Miért ugrál terjedés közben az akciós potenciál?
Mesterséges idegsejtek: hogyan írják le a matematikusok az idegsejtek jelfeldolgozását?
A két lábra állás meséje: az energiazabáló agy.
A két lábra állás meséje: mi kell egy nagy agyhoz?
Dadusok és bestiák: Felvezetés
Dadusok és bestiák: A gliák kialakulása és fejlődése
Dadusok és bestiák: A vér-agy gát és az agyi immunrendszer.
Dadusok és bestiák: A gliák funkciója
Mit írt az elektrubadúr a gliasejtekről?
Az idegrendszer részeinek evolúciója
Az agy darabolása: az agykéreg és a kéreg alatti területek funkciója
Miben tér el az agykéreg a kéreg alatti területektől?
Agyunk PPU-ja a kisagy!
Az idegsejtek működésének hangolása I: A jelátvitel szintjei.
Az idegsejtek működésének hangolása II: A jelösszegződés finomhangolásának módjai
SzürkeÁllomány második évad: a hálózatok kialakulása
Rendrakás az agy, elme és AI fiókjaiban I.: A tudatos agy funkcionális darabolása
Rendrakás az agy, elme és AI fiókjaiban II.: Agyi szószedet
NI és AI, esetleg AGI: ki tudatos és ki intelligens?
Az AGI, a tudatosság és a jövő
Az örvényféreg meséje I: hogyan készül egy modell állat?
Az örvényféreg meséje II: Hogyan dönt az idegrendszer?
A kutya meséje: a tanulás feltalálása
A tengerinyúl és a csikóhal története: a tanulás útjai
Technikai: A Hebb szabály molekuláris mechanizmusai
Neuronhálók újratöltve: A mátrix memória

Mátrix forradalmak: Mintagenerálás, önálló aktivitás, általánosítás, csoportosítás ...
Hogyan kódolják az idegsejtek a külvilágot: reprezentáció – receptív mezők, populációs kód
A macskakölyök meséje: Hogyan formálódnak a hálózatok és hova jutnak el?
A visszacsatolás dícsérete: a percepció modern elmélete
A harmadik elméleti keret: Konnekcionizmus és PDP I.
A harmadik elméleti keret: Konnekcionizmus és PDP II.
Soros vs. párhuzamos feldolgozás
Soros és párhuzamos egymás tükörképei
Az űrhajós meséje: a biológia tervrajz helyett programot használ
Az agyfejlődés programja I.: idegsejtfejlődés, kapcsolatépítés
Az agyfejlődés programja II.: túltermelés és térképek az agyban
Az agyfejlődés programja III: a második program, a tanulás
A hálózattervezés csúcsa: Az agykéreg I.
A hálózattervezés csúcsa: Az agykéreg II.
Az agykérgi modulok szerveződési alapelvei
Az agykérgi oszlop finomszerkezete: mit csinálnak az egyes rétegek?
Az agykérgi oszlop finomszerkezete: hogyan áramlik az információ az oszlopokon belül, az oszlopok és az agyterületek között?
A kérgi mikroszerkezet evolúciós kontextusban: Hogyan fejlesszünk agykérget?
Az agyi stabilitás keretei
A gátlósejtek szerepe és működése I.
A gátlósejtek szerepe és működése II: Előrecsatolt és visszacsatolt gátlás
A gátlósejtek szerepe és működése IIII: A dendriteken és sejttesten végződő gátlás hatásai
A bonyolult neuron modell I
A bonyolult neuron modell II
A gátlósejtek és a hálózatok aktivitásának modulálása
A visszacsatolás dicsérete: miért jobbak a visszacsatolt hálózatok?
Összefoglalás: Mit tudnak az idegsejthálózatok?
Harmadik évad: Az agyterületek kölcsönhatása és a belső modellek
Hálózatok két szinten: nem minden agyi hálózat skálafüggetlen
Az agy felparcellázása: honnan tudjuk, hogy az agy egyes részei mással foglalkoznak?
A Makákó meséje: a látórendszer szerveződése
Az agykérgi feldolgozás szintjei és kölcsönhatásai: tudja a bal kéz mit csinál a jobb!
Hogyan tanulhatok hatékonyabban? A memóriák fajtái és kölcsönhatásaik.
Ki-ki mellé telepedik az agykéregben? A modalitások kölcsönhatásai.
Multimodális asszociációs területek, ahol az információk összefutnak: a hippokampusz, az amigdala és a homloklebeny
Hippokampusz - Az élmény: hogyan éljük át a pillanatot és mit tanuljunk meg I.
Hippokampusz - Az élmény: hogyan éljük át a pillanatot és mit tanuljunk meg II
Az amigdala – Az érzelmek: mitől-kitől tartsunk és mitől-kitől ne I
Az amigdala – Az érzelmek: mitől-kitől tartsunk és mitől-kitől ne II
A válasz megtervezésének hierarchiája: A jelfeldolgozás és a válasz kapcsolódása
A homloklebeny funkciói
A homloklebeny szerveződése
Hol mi történik a homloklebenyben
Jobb és bal félteke: miben mások
Jobb és bal félteke: kiegészítik egymást
A visszacsatolás dícsérete III.: A mozgástervezés és a gondolkodás hurkai

A mozgástervezés hurkainak anatómiája
A tervezés lépései a homloklebenyben és a mozgató kéregben
A törzsdúc- és a kisagy-kör működése I.
A törzsdúc- és a kisagy-kör működése II.
A visszacsatolás dícsérete IV.: A tanulás hurkai
Az emlékezés labirintusa: a memória fajtái
A memória típusai
A memória időbelisége, memórialánc és megerősödés
A tanulás típusai
A jutalmazási rendszer:
A jutalmazási folyamat első lépése, az RPE kiszámítása
A jutalmazás folyamat második lépése, a dopaminfelszabadulás többszörös hatása
Hogyan és hol vált ki a dopamin tanulást?
Hogyan vált ki a dopaminfelszabadulás örömet és sikerélményt
Egyszer hopp, máskor kopp: A jutalmazási rendszer és a tanulás működése különböző esetekben
Az agyi (meta)hálózatok összefoglalása: Visszatekintés – kitekintés
A világ többszintű megjelenése az agyban és a számítógépben.
A világ többszintű megjelenése az agyban és a számítógépben II.
Az emberi gondolkodás plusszai: belső állapotok és többlépcsős gondolkodás
Beköszöntő a SzürkeÁllomány negyedik évadához
Mit várunk el egy hálózattól? Az agykérgi területek működésének időosztásos működése (multiplexelése)
Az EEG és a viselkedés összefüggése I.
Az EEG és a viselkedés összefüggése II.
A tengericsikó meséje I: A hippokampusz kapcsolatrendszere és működési módjai
A tengericsikó meséje II: A gamma és az éleshullám aktivitás keletkezése
A tengericsikó meséje III: A sejtek és a szinaptikus átvitel tulajdonságainak hangolása vált a hálózati működési módok között
Az idegsejtek suttogásának meglesése IV: Hogyan vizsgálható az idegsejtek működése és a tudatállapotok közötti összefüggés?
Az idegsejtek suttogásának meglesése IV: Hogyan értelmezzük amit mértünk?
Az agy funkcionálisan azonosított hálózatai I: Miért vált az agy pillanatról-pillanatra
Az agy funkcionálisan azonosított hálózatai II: Ki mikor kapcsol be és mit csinál?
Az agyi területek összhangjának és működési módjainak összehangolása I: a homloklebeny, mint a tudatosság központja
A tudatosság kialakulásának egyik modellje: a Global Neuronal Workspace Theory
Az agyi területek működési módjainak összehangolása II: a kéreg alatti modulációs központok szerepe
Elméleti kitérő: a párhuzamos-soros probléma feloldása I.
Elméleti kitérő: a párhuzamos-soros probléma feloldása II.
A beszéd és a tudatosság kapcsolata
A tudatállapotok bozótósa
Az emberi tudatállapotok I.
Az emberi tudatállapotok II.
Nem alszik, nem éber, mi az? Egy speciális agyi állapot: az altatás
Nem alszik, nem éber, mi az? Egy speciális agyi állapot: az altatás II.
Állati tudatszintek és az „Umwelt”
Gyermekből felnőtt, a kamaszkor bökkenője
Ki az az ÉN?
A vezérfonál, ami gyakran korbács

A piros pirosa. Mik azok a kváliák és honnan jönnek?

Cikkek

Beindítjuk a SzürkeÁllományt!

Kedves Érdeklődő!

A SzürkeÁllomány tudományos blogot azzal szándékkal indítjuk, hogy bemutassuk hol tart most az agykutatás. A lendületet az az élmény adta, hogy az elmúlt évtizedben két fontos dolog történt az agy kutatásában. Egyrészt a számítástechnika és elektronika fejlődésének köszönhetően számos új módszert dolgoztak ki, melyek képesek finom tér és időbeli felbontással elemezni az élő és működő agy nagyszámú idegsejtjének működését. Másrészt a matematikusok és fizikusok által kidolgozott, „big data" adatelemző módszereket is bevetették az agyban megfigyelt kölcsönhatások elemzésében. Egy bátor állítással azt mondhatjuk, hogy van már fogalmunk arról, hogy a hálózatokat alkotó idegsejtek kölcsönhatásából hogyan alakul ki a tudatos gondolkodás.



Nem titkolt reményünk, hogy az agykutatás egymásra épülő eredményeinek bemutatásával fel lelkesítsük a fiatal agyakat a tudomány művelésére és jövendő kollegákat toborozzunk.

Gulyás Attilának hívnak, neurobiológus vagyok. 30 éve dolgozom a KOKIban (MTA majd HUN-REN Kísérleti Orvostudományi Kutató Intézet) ahol először, mint neuroanatómus kutattam az agykérget alkotó idegsejtek fajtáit, tulajdonságait, összeköttetéseik szabályait majd, mint elektrofiziológus vizsgáltam, hogy ugyanezek a sejtek hogyan működnek és hogyan lépnek kölcsönhatásba egymással és ezek során hogyan képesek megalapozni az agy működését? [Hogy a neuro meg az elektro mit jelent, azt elmagyarázzuk amikor az agykutatás módszereit mutatjuk be.]



A Szürke Állományt elsősorban én szerkesztem és nagyrészt írom is, de gyakran fogok kollegáim segítségére hagyatkozni, hiszen a kutató ismérve az, hogy tudatában van annak mit nem tud és mit szeretne megtudni. Az agykutatást több szálon mutatjuk majd be. Nem egy kimerítő, részletekbe menő anyagot akarunk a fejetekbe tömni. Inkább az alapelvekre, szerveződési és működési szabályokra tesszük a hangsúlyt, sok példával és személyes élménybeszámolókkal. Szeretnénk, ha kialakulna egy „kérdezz-felelek-szerintem így lehet" beszélgetés a blog szerkesztői és olvasói között. Hiszen a tudást interaktív módon lehet igazán hatékonyan átadni. Ezért bárkinek bármilyen kérdése merül fel azt ossza meg velünk (hozzászólásban vagy szurkeallomany kukac koki pont hu email címre küldve). A kérdésekre mielőbb, vagy ha a tervezett gondolatfolyamokhoz kapcsolódhat, az adott alkalommal lelkesen válaszolunk.

És akkor a szálak:

#agyhírek: Érthető, élvezhető módon szeretnénk bemutatni, hogy az ELKH Kísérleti Orvostudományi Kutató Intézetében, illetve tágabban a magyar agykutatásban milyen új eredmények láttak napvilágot, és ezek mit is jelentenek, miért fontosak? A száraz és unalmas „THX1138 hatása a béta-galaktozidázra" típusú, kutatóknak szóló címek mögött rejlő tartalom jelentését, fontosságát próbáljuk meg bemutatni, szándékunk szerint érthető módon.

#agyséta: Ez lesz a Szürke Állomány gerince. Túrúra hívjuk azérdeklődőket, hogy bejárjuk az agy szerveződési szintjeit, bemutatva az egyes szintek szerkezetét, működését, illetve, hogy a szintek hogyan épülnek egymásra, hogyan juthatunk el az idegsejtek működésétől a tudatosságot megalapozó folyamatokig? Összefoglaljuk az idegsejtek felépítését és működését, hogyan alkotnak az idegsejtek agykérgi hálózatokat, ezeknek mik a szabályai és hogyan működnek? Hogyan kapcsolódnak össze az egyes agyterületek a viselkedéssel összefüggően, térben és időben precíz mintázatokat mutató információ feldolgozó rendszerekké? És végül ezek hogyan szolgálják a tudatos folyamatok, személyiségünk és viselkedésünk kialakulását?

#agytechnikák: Szót ejtenénk az agykutatásban és megismeréstudományban használt módszerekről, hogy érthetőek legyenek az eredmények és megismertessük, hogyan és miért tudunk következtetéseket levonni? Mi az a 3D pásztázó konfokális mikroszkóp? Miért használ egy agykutató PCR-t és mi is az? Hogyan lehet egy fluoreszkáló transzgénikus egér segítségével megérteni az agyműködést?

#diákélet: „Meghívjuk" az Intézetünkben kutató diákokokat (Tudományos Diák Körösök, TDKsok) illetve doktoranduszokat (PhDisták), hogy mondják el hogyan csatlakoztak hozzánk, milyen módokon vesznek részt a kutatásban, milyen témákon dolgoznak és milyen is a kutatói pálya.

#agykérdések: ezen a szálon a beérkezett kérdésekre próbálunk meg választ adni. Küldjetek tehát minél több, minél vadabb kérdést a szurkeallomany kukac koki pont hu címre. Pl: Mi az az MSG és miért kapok tőle fejfájást? Mi a déja vu? Miért nem tudok egy verset megtanulni amikor a matek meg jól megy? Miért van (vagy volt) taurin az energiaitalokban (és már miért nincs)?

#könyvajánló: ebben a rovatban újonnan megjelent vagy már régóta elérető figyelemre méltó, szemléletformáló könyvekről írunk. Olyan könyveket is megemlítünk majd amelyek angolul íródtak és még sajnos nincs magyar fordításuk, de fontosnak tartjuk. Hátha ez vesz rá valakit hogy angol nyelvtudását csiszolja.

#AI: A mesterséges intelligencia és az ember agy kapcsolatát érintő témák

A blognak Bluesky @szurkeallomany.bsky.social, X/Twitter @SzurkeallomanyB, Instagram @szurkeallomany és Facebook @SzurkeAllomanyBlog jelenléte is van. Elérhető RSS feeden is.

írhatsz nekünk a szurkeallomany@koki.hu címre.

Vágjunk hát bele Együtt!

Jó utat

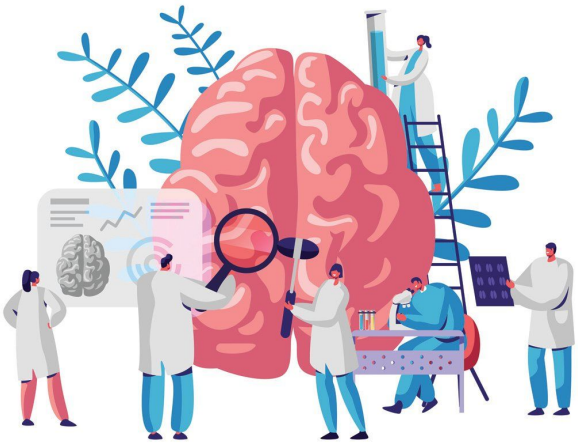
Dr. Gulyás Attila



Elméleti keretek

Ezzel a bejegyzéssel indítjuk az #agyséta rovatot, ami egy túra lesz az agy szerveződési szintjein felfelé. Túrázáshoz nem csak útiterv, de felszerelés is kell. Felszerelésünk legfontosabb elemei azok a fontos alapelvek, elméletek és azok tanulságaik lesznek, amiknek keretében az agyműködés jelenségeit és szintjeit könnyebben megérthetjük.

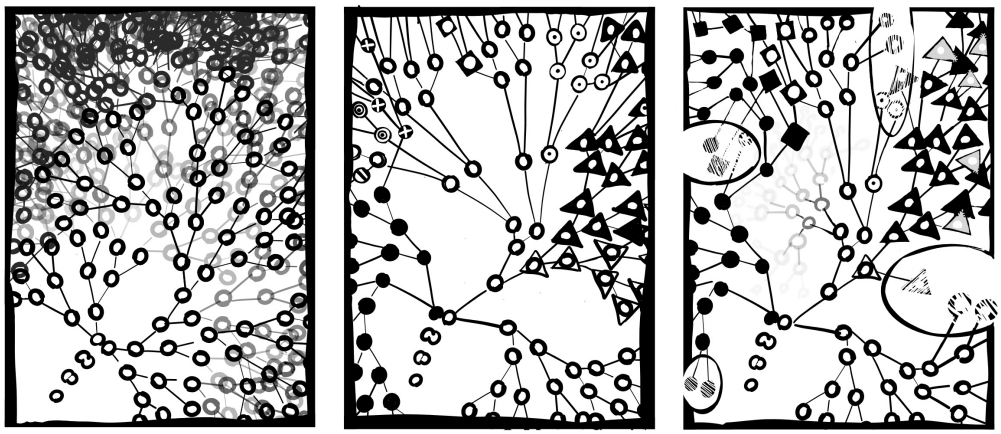
Iránytűnek szolgáljon a kíváncsiság és a kételkedés. A legfontosabb, hogy tudjuk, ha valaki valamiről kételkedés nélkül azt állítja, hogy az biztos úgy van az nem tudós elme, hanem dogmatikus. A tudomány tényeken alapul. Ezek olyan megfigyelések, amiket bizonyítékok támasztanak alá és jelenlegi tudásunk szerint nem mond nekik ellen semmi. Egy tudományos elmélet, pedig egy olyan magyarázat, mely az eddig megismert tényeken alapul és nincs neki ellentmondó tapasztalat. Egy tudós mindig nyitott kell legyen arra, hogy ha olyan adattal találkozik, ami ellentmond az eddigi tényeknek és ezeken alapuló elméletnek, akkor az elméletet elvesse és az új tényeket beillesztve akár gyökeresen új elméletet dolgozzon ki. Lásd ugye az elcsépelt példákat, hogyan váltotta fel az Einsteini általános relativitás elmélete a Newtoni mechanikát, mivel az nem tudta megmagyarázni a Merkúr perihélium vándorlását. Illetve, hogy a kvantum mechanika hogyan nőtt ki abból, hogy a statisztikus fizika nem tudta megmagyarázni a fekete test sugárzás színképét.



Lévén az agy biológiai objektum, természetesen a természettudomány Darwin által feltárt egyik legfontosabb mechanizmusát **a Természetes Kiválasztódás-t, az Evolúció elmélet-ét** tekintjük át először. Utána a természettudományok mindegyikében megjelenő **szerveződési szintek** fogalmát és a hozzá kapcsolódó **Emergencia** (Felbukkanás?) jelenségét tárgyaljuk. Kicsit majd később az ideghálózatok működésének egyik legelfogadottabb elméletét a **Parallel Disztributed Processing**-et (PDP, magyarul **Párhuzamos Megosztott Feldolgozás**-t) és állításai mutatjuk be röviden.

Keretezzünk elméletekkel I: A vak órásmester

Hogy megértsük a Természetes Kiválasztódás elméletét és annak következményeit érdemes összefoglalni annak 3 elemét: Öröklődés, Változatosság, Szelekció. Mi is történik az Evolúció során? 1) Az élőlények tulajdonságaikat DNS-ükön keresztül átadják utódaiknak, akik azt tovább adják. 2) Egyik generációról a másikra az átadott információ nem teljesen pontosan kerül át, az utódok tulajdonságai kicsit eltérnek a szülők tulajdonságaitól. 3) Az adott környezetben az utódok egy része az adott génekkel jobban boldogul, mint mások, több utódot nevel és ezek továbbadják az adott környezetben hatékonyabbnak bizonyuló génjeiket.



Az evolúciós mechanizmus 3 fő leme: replikáció, mutáció, szelekció

Az evolúciós mechanizmus 3 fő leme: replikáció, mutáció, szelekció

Mik is ennek a következményei? 1) Először is az evolúciós mechanizmus vak, nincsenek céljai, nem halad semmilyen kiválasztott irányba (Dawkins: A vak órásmester). Hogy melyik gének kedvezőbbek és melyik irányba fejlődnek az élőlények, azt a véletlen és a környezet határozza meg. 2) Ugyanezek miatt az evolúciós megoldások nem feltétlenül elegánsak, hatékonyak és átgondoltak hiszen csak arra választódtak ki, hogy adott környezetben jobb megoldást adjanak, mint egy másik. Az evolúció leginkább a barkácsolásra, buherálásra (angolul tinkering) hasonlít, abból építkezik, amit a megörökölt sufniban (genomban, DNS készlet) talál. 3) Ennek egyik megnyilvánulása, hogy sok esetben egy-egy gént vagy mechanizmust teljesen más célra használ fel az evolúció, mint amire eredetileg kifejlődött. Így lettek például a kétéltűek álkapocs csontjaiból hallócsontok az emlősökben, a halak oldalvonalszervéből így alakult ki az egyensúlyt érzékelő szervünk, vagy a nyálmirigyekből méregmirigyek alakultak a kígyókban. 4) Az evolúció során keletkezett megoldás hordozza az összes felmenő történetét. Lásd a már csak gondokat okozó bölcsesség fog és vakbél esetét (bár utóbbiról kezdik sejteni, hogy az immunrendszer fontos eleme lehet). De példa erre, hogy bár a madarak már elvesztették fogaikat (mert feleslegesen nehezek) de a fogzománc készítésének génjei még mindig ott lappanganak genomjukban. 5) Egy gén és egy ezáltal meghatározott tulajdonság önmagában nem jó vagy rossz, hanem csak egy adott környezetben minősül. De igaz ez az élőlényekre is. Sikeresebb-e az ember, mint a multidrog-rezisztens Staphilococcus aureus vagy az Antarktiszi krill ami jelenleg a legtömegesebb élőlény a világon? Az adott környezetben nem állíthatjuk ezt. Az ember jóval összetettebb és ha csak ki nem irtjuk magunkat minden esélyünk megvan arra, hogy jelentősen megváltozott környezetben is túléljünk. Bizonyíték erre, hogy emberek a föld minden égövén megélnek, sőt mostanában már a tengerek mélyén és a világűrben is.

Még egy fontos dolog: amikor pl. az emberi agy bonyolultságát csodáljuk, ne felejtsük el az iszonyatos számokat, amivel az evolúció dolgozik. Számoljunk egy kicsit. A Föld,

jelenlegi tudásunk szerint (ugye sosem állítunk valamit bizonyosan) 4,54 milliárd éves. Az első életre utaló nyomokat 3,2-3,8 milliárd évesnek teszik. Mivel őseink az evolúció során elsősorban rövid generációs idejű élőlényekként léteztek, legalább ennyi generációja élt az élőlényeknek, de valószínűbb ez 1-2 nagyságrenddel nagyobb (~1x10^11). Ezzel megbecsültük az idő léptékét. Most becsüljük meg a tér léptékét, azaz, hogy egy adott pillanatban egy fajnak hány egyede élhetett, akinek utódjai hosszútávon versenyeztek egymással a túlélésért. Ez nehezebb feladat, hiszen nem tudjuk hány faj élt egy időben a különböző korokban. De ez a szám nem valószínű, hogy kisebb volt, mint jó néhány milliárd (~1x10^10). Vagyis 1x10^11 x 1x10^10 azaz 1x10^21 szelekciós esemény legalább történt időközben.

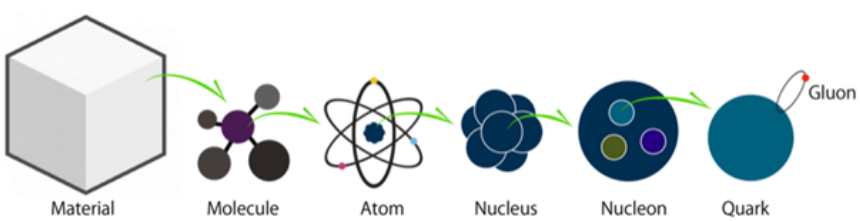
Hogy az evolúciós szelekció szigorúságát megértsük gondoljuk át azt, hogy a földtörténet során 1 egyednek átlagosan 1 utódja marad életben. Amennyiben ez nem így lenne a Földön egyre több élőlény lenne, márpedig nem ez a helyzet. Akinél ez kisebb, mint 1, az kihal, akinél pedig nagyobb, az elterjed, de ez kiátlagolódik a kihalókkal. Képzeljük el, hogy egy tölgyfa 300 évig él és évente 10,000 makkot terem, azaz élete során 3 milliót. Azonban ennek a tölgyfának hosszútávon és statisztikusan csak 1 utódja fog makkokat teremni. Ez azt jelenti, hogy a tölgyfa esetében 1 a 3 millióhoz az esély, hogy nagyszülő legyen! Ilyen számokkal dolgozik a természetes szelekció! Nyilván a tölgy esetében sok függ a véletlentől, hiszen, hogy egy makk felnő-e függ attól hova hullik a makk, milyen az időjárás az adott évben és jár-e arra turkáló vaddisznó. Nem véletlen, hogy az állatokban kialakult az idegrendszer, hiszen az jelentősen csökkenti a véletlen hatások esélyét (erről is beszélünk majd) és ezért kevesebb utódot kell létrehozni.

Agyunk kialakulása tehát egy igen hosszú, szigorú, de vak folyamat eredménye és amikor elemeit próbáljuk megérteni ezt ne felejtsük!

Keretezzünk elméletekkel II: A szerveződési szintek fogalma

A mai szösszenetben azzal kezdjük mit is jelent az, hogy szerveződési szint.

A kémikusok a világot vizsgálva feltárták, hogy az általunk érzékelhető világ molekulákból és atomokból áll. A fizikusok tovább ástak és kimutatták, hogy az atomok atommagból és elektronokból, a mag protonokból és neutronokból áll. De még ezek sem bizonyultak alapegységeknek, mivel kvarkokból állnak össze. A húrelmélet szerint az összes elemi részecske mögött sokdimenziós rezonáló húrok állnak, de idáig már nem megyünk le. Felfelé indulva a biológusok felderítették, hogy a molekulák sejtalkotórészekké, ezek sejtekké, majd szövetekké állnak össze. Több szövetből állnak funkcionális egységekké a szervek, amelyek szervezeteket, élőlényeket alkotnak. Az etológusok és ökológusok azt kutatják, hogy egy faj egyedei vagy több faj együtt hogyan viselkednek, milyen közösségeket alkotnak. Az emberi közösségek esetében közgazdászok és történészek vizsgálják, hogy mi történik a közösségek kölcsönhatása során.



Az anyag alkotóelemei tehát különböző szinteken egyre összetettebb rendszereket alkotnak. Az egyes szintekre jellemzőek kölcsönhatási módok. A kvarkokat a gluonok ragasztják az erős kölcsönhatás útján nukleonokká. A nukleonokat a gyenge kölcsönhatás tartja össze atommaggá. Az atomban a magot és az elektronokat az elektromágneses kölcsönhatás köti. Ugyanez a kölcsönhatás dolgozik a molekulák szintjén is. A fehérjéket is az elektrosztatikus erők kapcsolják molekuláris szerkezetekbe, majd sejtekbe. A sejtek jelátvivő anyagok és felszíni receptorok útján kommunikálnak és állnak össze szövetekké és szervekké. Az egyedet alkotó szervek az idegrendszer elektromos és hormonális utasításait követik. Az egyre fejlettebb közösségeket alkotó fajok viselkedését illat, mozdulat, hang (szélsőséges esetben beszéd) útján hatnak kölcsön és szervezik közösségeiket. A társadalmakat az eszmék, a pénz, az adózás és még sok más kölcsönhatási mód szervezi. **Jellemző tehát minden szintre egy vagy több azt szervező kölcsönhatás.**

Fontos alapelv, hogy egy szerveződési szint vizsgálatához és megértéséhez nem feltétlenül kell az összes szerveződési szintet értenünk. Ez látszik a tudományok kialakulásának történetében is. A még mindennel foglalkozó klasszikus filozófusokat az ismeretanyag halmozódása miatt a középkorban felváltották a természet egy-egy aspektusát vizsgáló kutatók: csillagászok, alkímisták, matematikusok, filozófusok. Ezekből a tudományágakból aztán kialakultak az iskolában tanított természettudományos tárgyakkal foglalkozó tudományágak, melyek rájuk jellemző mérési módszereket, megközelítéseket és műszereket használnak.

Ám ahogy ismereteink és kérdéseink szaporodtak a XX. században kiderült, hogy minden mindennel összefügg. Kialakultak a határtudományok (biokémia, biofizika, fizikai kémia, stb), hiszen az alaposabb megértéshez szükség van arra, hogy feltárjuk **a szerveződési szintek hogyan függenek össze és egy szint kölcsönhatásai hogyan vezetnek a felette álló szint tulajdonságaihoz.** Ez nem egy könnyű kérdés, a szintváltásoknál ugyanis látszólag új, megmagyarázhatatlan tulajdonságok bukkannak fel. A felbukkanás kifejezés angolul-latinul „emergence", magyarosan „emergencia", mely a jelenséget leíró fogalommá vált (http://consc.net/papers/emergence.pdf). Az elemekből összeálló rendszer megértésének legújabb módszerei a számítógépes modellezés és a big-data elemzése összetett matematikai módszerekkel.

Mi az az idegtudomány?

A tudományos nyelvben az idegrendszerrel kapcsolatos kutatásokat „neuroscience"- idegtudományok vagy „brain science"- agytudományok neveken azonosítják. Azért van ennek a diszciplínának külön neve, mert több szerveződési szintet vizsgál, több klasszikus tudományág módszereit és megközelítéseit is igénybe véve.

Alulról felfelé

Az agyműködés megértését, mint számos összetett fizikai jelenségét, két irányból lehet közelíteni: alulról a molekulák, sejtek felől indulva és az idegsejthálózatok felé haladva (ez a „bottom-up", azaz az alulról felfele építkező megközelítés), illetve felülről, a viselkedés és gondolkodás felől indulva az agyműködés szabályainak megértésének szándékával (ez a „top-down", azaz felülről-lefelé haladó megközelítés). Az előbbit a neurobiológusok az utóbbit a pszichológusok, neurológusok, megismeréskutatók (cognitive scientist) művelik, az agy működését más szerveződési szinteken, eltérő módszerekkel vizsgálva. A neurobiológust gyakran keverik össze a neurológussal. Míg az előbbi egy biológus, aki az idegsejtek működésének alapelveit próbálja felderíteni, elsősorban kísérleti állatokban, az utóbbi orvosi diplomával rendelkezik és embereket gyógyít.

A neurobiológusok (jómagam is) az apró dolgok felől indulnak. Az idegsejtek

felépítését és kölcsönhatásait, valamint a magatartás, viselkedés, mentális betegségek idegsejtek szintjén megnyilvánuló jellegzetességeit vizsgálják anatómia és élettani módszerekkel. Mikroszkópot, elektronmikroszkópot, különböző szövet festési technikt, valamint egy vagy több sejt működésének vizsgálatára alkalmas elektrofiziológiai módszereket alkalmaznak. A technikákról bővebben lesz majd szó az **#agytechnikák** rovatban.

Felülről-lefelé

A másik irányból, a viselkedés felől közelítő pszichológusok és megismeréskutatók a magatartás, gondolkodás, memória elemeit, kapcsolatait és struktúráit vizsgálják kérdésekkel, reakcióidő mérésével és egyéb tesztekkel. A neurológusok és pszichiáterek a megbetegedett agy elváltozott struktúráinak, illetve megváltozott gondolkodásmódjának vizsgálatával járulnak hozzá ahhoz, hogy megértsük az agy működését.

Az agy megértésének problémáján dolgozók között egyre fontosabb szerepe van az idegrendszer működését modellező és a komplex mérési eredmények feldolgozásában résztvevő, idegtudósokhoz csatlakozó matematikusoknak, fizikusoknak és adatbányászoknak. Ők fontos új szemléletmódokat és szaktudást hoznak magukkal tudományágaikból.

Ugyanígy fontos a tudat-filozófusok hozzájárulása is, akik új nézőpontokkal és irányok kijelöléséve mutatnak új kutatási irányokat (pl. Daniel Dennet, Steven Pinker (ő inkább pszichológus/nyelvész), John Searle, Thomas Nagel).

Középen összeértünk: A neuropszichológia

A két klasszikus megközelítés követői több mint száz éve dolgoztak egy alagút két végének építésén, egymás munkáira nem sokat reagálva, ritkán kölcsönhatva.

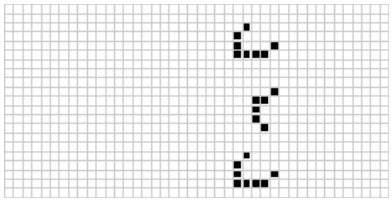
A kétezres évek második évtizede viszont hihetetlenül izgalmas volt. A számítási kapacitás hihetetlen fejlődése lehetővé tette egyrészt az agyi folyamatok finomfelbontású műszeres vizsgálatát (fMRI, sokcsatornás EEG), másrészt a big-data és a hálózatkutatás módszereinek az agyműködés elemzésére való felhasználtását. Ezzel lehetővé vált, hogy a két, ellenkező irányból induló megközelítés találkozzon egymással. Alapvonalakban mostanra megértettük azt, hogy idegsejtek kölcsönhatásából hogyan alakulhat ki az idegi mintázatok térben és időben szervezett váltakozása, mely a tudatosság kialakulásához vezet.

Keretezzünk elméletekkel II: Az Emergencia fogalma

Nézzük meg kicsit alaposabban mi történik a szerveződési szintek lépcsőfokain. Van egy rendszerünk mely elemekből áll. Például, egy léggömb tele gázmolekulákkal (amik szintén struktúrák, de ezt itt most elhanyagolhatjuk, hiszen az atomi szerveződési szintet itt nem kell vizsgáljuk). Tudjuk, hogy a molekuláknak van tömege, alakja, és hogy ütközések útján kölcsönhatnak egymással. Azt is tudjuk, hogy a magasabb szintű struktúrának - a gáznak - a lufiban van nyomása, fajhője, megtöri, szórja a fényt, meghatározott sebességgel terjed benne a hang és netán még gyúlékony is lehet. Ezek teljesen más tulajdonságok, mint ami a molekuláit jellemzi. Amikor összerakjuk a molekulákat, azok kölcsönhatásba lépnek egymással (hihetetlen nagy számúba) és felbukkan valami új, számos újabb tulajdonsággal.

Ez a jelenség az emergencia (felbukkanás).

Aki hallott már Conway Életjáték nevű igen egyszerű szabályokon alapuló sejtautomatájáról az már ismer is egy emergens rendszert. Ha nagy nagyítással nézzük a fejlődő sejteket akkor villogó kis alakzatokat látunk, amik az igen egyszerű szabályok alapján egymásba alakulnak vagy eltűnnek.



De ha szigorú rendben helyezünk el egy hatalmas területen pontokat akkor abból egy nagy, bonyolult viselkedést mutató struktúra is kialakulhat. Ügyes matematikusok még számítógépet is építettek az életjáték sejtjeivel, ami tetszőlegesen bonyolult feladatokat is meg tud oldani (igaz rettentően hosszú idő alatt). Egy ilyen gép központi „processzora" látható alant. Alkatrészei, apró, folyamatosan változó elemekből állnak.



A fenti "számítógép" rengeteg elemből áll, nagyon bele kell nagyítani ha az egyedi "sejteket" látni akarjuk. Hasonló a lépték-különbség egy sejt aminosavakból álló fehérjéi és egy működő sejt között is. Hasonlóan sok funkciót ellátó tulajdonságok fakadnak a fehérjék kölcsönhatásából.

De hogyan fakadnak az egyik szint tulajdonságaiból a magasabb szint tulajdonságai?

A kutatók/filozófusok megkülönböztetnek gyenge és erős emergenciát. Az erős emergencia azt jelenti, hogy a felbukkanó tulajdonságok váratlanok, nem egyértelműen fakadnak az összetevők tulajdonságaiból, nem tudjuk megmagyarázni őket. A gyenge emergencia azt jelenti, hogy ugyan a tulajdonságok mások, de könnyen levezethetők az alkotórészek tulajdonságaiból és kölcsönhatásaiból. A tudomány története során persze gyakran válik az erős emergencia gyengévé. A levegővel tellt lufi példájával is ez történt. A hangsebesség és fajhő megmagyarázhatatlan értékeit a Maxwell, Boltzman és Gibbs által megalapozott statisztikus mechanika tökéletesen megmagyarázta. Az ütköző molekulák között statisztikusan terjedő nyomáshullám sebessége a hangsebesség, a molekulák növekvő sebessége, forgása és rezgése által elnyelt energiamennyiség a fajhő, stb.

Hogy a következő szinten miért jelennek meg a tulajdonságok, arra talán a legjobb magyarázat az, hogy az elemeknek vannak olyan tulajdonságaik amik az alacsonyabb szinten nemigen nyilvánulnak meg. Ha azonban sok elemet összeteszünk akkor ezek a

látszólag elhanyagolható tulajdonságok elkezdik alakítani a rendszer viselkedését. A gázzal tellt lufiban az elemek az atomok (ha héliumos lufiról van szó) vagy molekulák (ha levegővel fújtuk fel). Az atomi szinten a protonokat és a neutronokat, valamint az atommagokat az erős és a gyenge kölcsönhatás tartja össze, az atomban a magot és az elektronfelhőt, pedig az elektromos vonzás (ami az elektromágneses kölcsönhatás egyik megnyilvánulása). Amikor sok molekulát a lufiba zárunk, az atommagban ható kölcsönhatások nem nagyon fognak látszódni, csak az, hogy vannak atomok. Az összevissza pattogó molekulák egyetlen kölcsönhatás útján az elektromos erőtér útján hatnak kölcsön. Amikor két molekula összeütközik, elektronjaik taszítják egymást, eltorzulnak a pozitív atommag körül, majd amikor visszarendeződnek, a két molekula elpattan egymástól. Az elektronmágneses tér rugóként nyilvánul meg. Ebből az új -emergens, felbukkanó- tulajdonságból, a rugalmasságból származik a hangsebesség, az összenyomhatóság. A molekulák mellett elcikázó fotonok szintén kölcsönhatásba lépnek azok elektronfelhőjével és lelassulnak, eltérülnek, ebből fakad a gázok törésmutatója és fényszórása. Amikor atomokat molekulákká rendezünk újabb emergencia is feltűnik, az atomok molekulákon belüli térbeli helyzete. Az atomokat kettesével rendezve (O_2, N_2) kicsi pálcikákat kapunk, hármasával rendezve (H_2O) kicsi háromszög alakot. Amíg egy magányos atom nem tud forogni, rezegni, addig egy molekula már tud pörögni és az atomok egymáshoz képest rezegni a kötések mentén (szintén az elektromos erőnek köszönhetően). Ezek mind hozzájárulnak ahhoz, hogy a molekulák mennyi energiát tudnak elraktározni, megjelenik a fajhő (emergens) tulajdonsága.

Vannak persze olyan emergenciák, amik továbbra is erősek és ez már a filozófusok kenyere, hogy biztos azok is maradnak-e majd, vagy idővel minden emergenciát sikerül megértenünk.

Lehet nem tűnt úgy, de amit eddig végig-gondoltunk az igencsak fontos sétánk szempontjából. A mai tudomány egyik legerősebb emergenciája (egyesek szerint az egyetlen) az agy működése során a tudatosságot kísérő belső élmény (kválé), mely kialakulásának megmagyarázására egyelőre lövésünk sincs. Részletesebben lásd majd a hamarosan megjelenő: „Miről nem beszélünk" bejegyzést.

A séta végére majd látni fogjuk, a tudatosság körül van egy gyenge emergencia is. Remélem, hogy akik követnek megértik a tudatosság sok vonását és, hogy ezeket hogyan alapozzák meg az agy szerkezetének és működésének egymásra épülő szintjei a maguk emergens tulajdonságaikkal.

Zárásként egy gyors útiterv az agyműködés megértése során érintett szintekről és emergenciákról:

-Az idegsejtek felszínén található ioncsatornákon és receptorokon folyó áramok alapozzák meg az idegsejtek jelintegrációjának szabályait és vezetnek ahhoz, hogy az idegsejtek kölcsönhatásba tudnak lépni egymással

-A kölcsönható idegsejtek hálózatában megjelennek a sejtaktivitás mintázatok, amik a külvilágot reprezentálják és kölcsönhatnak, illetve a szinaptikus súlyok módosulása kapcsán memórianyomok alakulnak ki, amik befolyásolják az idegsejtek aktivitásának fejlődését, az információ feldolgozását

-Az egyes agykérgi hálózatok összekapcsolódnak egy magasabb rendű hálózattá, melyek alacsonyabb szinten az ingerek alapvető tulajdonságait értékelik, magasabb szinten összetettebb mintázatokat, fogalmakat alakítanak ki

-Az eltérő szintű információfeldolgozást végző agyterületek térben és időben pontosan összehangolt kölcsönhatása alapozza meg a tudatosságot. A feldolgozás korai fázisait végző agyterületeken az információ feldolgozása mindig megtörténik, a tudatosságba akkor kerül be az információ amikor a magasabb rendű agyterületek is aktiválódnak és egy az adott feladatra jellemző kölcsönhatás alakul ki.

Miről nem beszélünk

Reméljük sokatokat lelkesíti a tervünk, hogy megpróbáljuk az agyműködés alapjairól és a tudatossághoz vezető folyamatok kialakulásáról összegyűlt tudást megosztani.

A kérdés nagyjából egyidős az emberiséggel és sokan sok irányból közelítették, közelítik. Hogy a leendő olvasók tisztában legyenek azzal, mire is számítsanak az utazás során, beszélnünk kell itt arról, hogy miről nem fogunk beszélni és miért!



Először is áltudományról nem fogunk beszélni. De mi is az és miért nem beszélünk róla?

Az emberek, vérmérsékletük szerint kétféle módon viszonyulnak a világhoz. Vannak, akik hisznek és vannak, akik meggyőződnek-vizsgálódnak. Mindkét megközelítés elfogadható, ha a maga keretei között marad (számomra legalábbis), de tudni kell, hogy teljesen eltérő alapokon állnak és eltérő, egymást kizáró módszereket használnak. A hit(ek) igazságaikat onnan nyerik, hogy valaki kinyilatkoztatta. Akik hisznek nem keresik az okokat, hanem elfogadják és igyekeznek hitüknek megfelelően élni.

Akik a vizsgálódás hívei, azoknak a Newton által javasolt tudományos módszertant kell szigorúan követniük. Azaz csak azt fogadják el aktuális igazságnak, amit a korábbi megfigyelések (kísérletek) igazoltak és semmilyen rendelkezésünkre álló ismeret nem mond neki ellen.

Az áltudományt onnan lehet megismerni, hogy a hit és a tudomány zavaros egyvelege. Valaki valamit gondol, majd állít, utána pedig, hogy igaznak tűnjön a tudományos módszertanból kölcsönzött szavakkal és fogalmakkal hadonászik, de nem építi fel az „igazságát" szilárd, tényeken álló, minden ponton támaszkodó alapokra. Gyakran figyelmen kívül hagyja az ellentmondó eredményeket, igen gyakran összeesküvés elméletet citál bizonyíték helyett. Nem személyeskednék itt példák felsorolásával.

A másik dolog, amiről nemigen írnánk, azok a megalapozatlan elméletek. Például hideglelést kapok tőle amikor (gyakran igen híres) fizikusok a kvantumelméletet citálják, mint a szabad akarat és tudatosság alapját. Ezzel szerintem több baj van. Egyrészt nem tudok arról, hogy bármiféle bizonyíték lenne rá, másrészt a kvantummechanika nélkül is meg tudunk magyarázni minden idegi jelenséget (egyelőre úgy tűnik a tudatosság kialakulását is). Occam borotvájára utalva, ha valamit egyszerűen meg tudunk magyarázni, akkor ne magyarázzuk bonyolultan. Mióta megírtam ezt a bejegyzést, olvastam Carlo Rovelli, magyarul is megjelent, Helgoland című könyvét. Akit érdekel a fizika mindenképp

olvassa el, mert a kvatummechanika furcsaságainak egy nagyon egészséges gondolkodású feloldását adja, kellő tiszteletet mutat a komplexitás iránt és ami fontos, Ő is elveti a tudat-kvantummechanika hókuszpókuszait.

A telepátiáról és „agyhullámok" útján zajló távoli kommunikációról és gondolatbefolyásolásról se beszélünk (időközben megírtam egy szösszenet arról miért nem). Nagyobbrészt azért nem, mert nem vagyunk szakemberek a témában. Kisebb, de nem elhanyagolható részben pedig azért, mert nem támogatja létezésüket egyetlen komolyan vehető kísérlet sem. Sőt a fizika törvényei (hozzá kell tennem: mai tudásunk szerint) nemigen teszik lehetővé. Hogy miért, az az EEG jelek keletkezéséről szóló bejegyzésből sejthető lesz majd. De ha valaki rákérdez (szurkeallomany@koki.hu) szívesen kifejtem az #agykérdések rovatban.

Végül egy teljesen ideillő -filozófusok által sokat vizsgált - problémával sem fogunk foglalkozni, mert egyelőre, nem látjuk milyen módon lehetne megragadni. Ez pedig a „hard problem of consciousness", a tudatosság nehéz problémája. Más néven „the problem of qualia", a belső élmény, a kvália problémája. Az én pirosom ugyanolyan-e, mint másé? Van-e egyáltalán másnak piros érzete? Attól, hogy nekem van, nem kell szükségszerűen másnak is lennie, azaz lehet, hogy rajtam kívül mindenki zombi, vagyis látszólag úgy viselkedik, mint én, aki tudja magáról, hogy tudatos, de közben nem az. Valamelyest ugyanide tartozik a „hard AI", azaz erős mesterséges intelligencia állítása is, hogy ha van egy fizikai rendszerünk, ami felépítésében pontosan megegyezik az emberi agyéval akkor azon automatikusan megjelenik a tudat és a tudat élménye. Az utóbbi kérdéshalmazra egyelőre nem tudunk kísérletet tervezni, ezért nem vizsgálható tudományosan és emiatt nem fogunk vele foglalkozni.

A két utóbbival ellentétben viszont, az „easy problem of consciousness"-t a tudatosság könnyű problémáját, a séta végére kb. megmagyarázottnak tekinthetjük. https://www.quora.com/What-is-the-easy-problem-of-consciousness

Állandó, Változó, változó állandóság és állandó változás: a Homeosztázis fogalma I.

Nézzetek körül. Csukjátok be a szemeteket és 10 másodperc múlva újra nézzetek körül. Láttok változást? Mindenhol láttok változást? Ahol láttok milyen az a változás? Ha 10 másodpercre újra becsukjátok a szemeteket meg tudjátok mindenről mondani mit fog csinálni?

Ha körülnézünk a minket körülvevő világban, a dolgok lehetnek állandóak vagy változhatnak. Az állandóság persze viszonylagos, de egy földön heverő sziklára mondhatjuk, hogy az állandóságot testesíti meg (legalábbis a mi életünk időléptékében). Ezt az állapotot mondják a fizikusok statikusnak.
A világban azonban a legtöbb dolog változik, még a kontinensek is vándorolnak. A változásoknak sok fajtája van. Ezeket a rendszereket a fizikusok dinamikus rendszereknek nevezik. A legegyszerűbb eset, hogy a rendszer elindul valahonnan és eljut valahova (szükségszerűen valami határhoz). Ilyen, amikor leesik egy alma a fáról, kihűl egy pohár tea vagy egy naprendszeren kívüli hiperbolikus pályán haladó aszteroida elszáguld a Föld mellett.



Állapotváltozói elindulnak valahonnan és változnak valameddig (esetenként a végpontban valami durva történik).



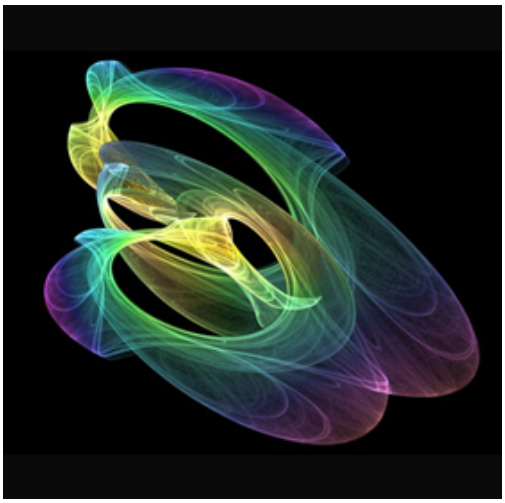
A változások gyakran lehetnek ismétlődőek, visszatérőek, körkörösek, azaz ciklikusak. Tavasz-nyár-ősz-tél-megint tavasz, leng az inga, kering a Hold a Föld körül stb. Ezekben az esetekben az állapotot leíró mérőszámok szabályos időközönként felveszik ugyanazokat az értékeket és a folyamat akár a végtelenségig ismétlődhet.



Történnek olyan változások is, amikor a következő pillanat megjósolhatatlan, valami más állapotba kerül a rendszer. Véletlennek mondjuk a viselkedését. Kihúzzák a lottószámokat, elbomlik egy atom egy radioaktív anyagban, a Dungeons and Dragons-ban 17-est dobunk az ikozaéder alakú dobó „kockánkkal". A változók egy széles tartományban bármilyen értéket felvehetnek és ebben nincs szabályosság.

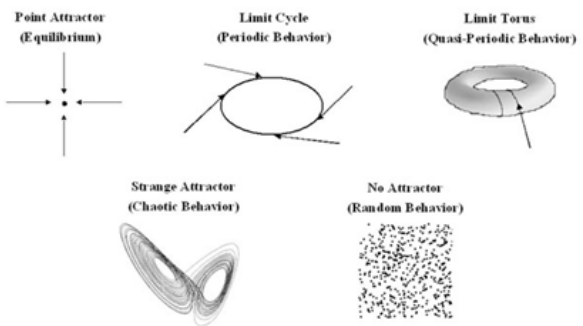
Az első három - a tömény unalomtól a mérsékelten érdekesig terjedő viselkedésű - rendszer (állandó, folyamatosan változó és visszatérő) leírását viszonylag gyorsan tudták kezelni a világ szabályait kereső fizikusok. A véletlennel már nehezebb a helyzet. Ugye akár mondhatjuk azt is, hogy véletlen nincs, csak nem tudunk eleget a rendszerről. Elképzelhető, hogy vannak olyan rendszerek, amik valóban véletlenek, másokról meg tudjuk, hogy nem tudunk eleget, ezért tűnnek véletlennek. De az embert érik meglepetések. Nagyon sokáig úgy gondolták, hogy a radioaktív bomlás az aztán igazán véletlen. Aztán valaki kimérte, hogy lehet mégsem, mert a klór izotópok felezési ideje függ az évszaktól. Ezt azzal magyarázták, hogy az év során a Föld-Nap távolság változik és emiatt a Napból a Földet elérő elemi részecskék, a neutrínók száma is. Ők pedig kellenek a negatív béta bomláshoz, azaz, hogy mikor bomlik el egy atom függ attól, hogy kölcsönhatásba lép-e egy igen kis hatáskeresztmetszetű neutrinóval. Így mondják flancosan a fizikusok azt, hogy nagyon-nagyon-nagyon kicsi az esélye annak, hogy egy neutrínó eltaláljon egy neutront és a negatív béta bomlás megtörténjen. Véletlennek látszik, pedig nem az.

A következő viselkedéstípust a fizikusok és matematikusok találták nem is olyan régen, amikor a véletlen és a bonyolultság határmezsgyéjén kutakodtak. Ezt a viselkedést kaotikusnak mondják és a viselkedést leíró elmélet a káosz elmélet. Ez azt mondja ki, hogy viszonylag egyszerűtől egészen bonyolultig léteznek olyan rendszerek, melyek a lehetséges állapotok közül nem veszik fel az összeset, hanem viselkedésük behatárolt. Annak ellenére,



hogy jövőbeli viselkedésüket egyértelműen meghatározza jelenlegi állapotuk (azaz determinisztikusan, meghatározottan viselkednek) azt, hogy egy bizonyos időpontban pontosan hol lesznek, még elméletileg sem lehet pontosan megjósolni. Klasszikus példa az időjárás. Azt tudjuk, hogy Magyarországon egyelőre nem szokott -20 foknál hidegebb lenni és 40 foknál melegebb, illetve, hogy van, amikor szárazság van, de van, amikor csapadék hullik. Viszont azt, hogy jövő év március idusán milyen lesz a hőmérséklet és a csapadékmennyiség csak körülbelül lehet megmondani, pontosan nem. Kaotikus még a tőzsde viselkedése, a szakálldivat és ha nagy időtávlatban nézzük, akkor a naprendszerben keringő égitestek mozgása is az.

A kaotikus rendszerekre jellemző, hogy pici beavatkozások idővel nagy különbségekhez vezethetnek (pillangó effektus), mivel a bennük lévő elemek sokat lépnek kölcsönhatásba egymással és ez felerősíti az eltéréseket. A lezajló folyamatok ugyan szigorúan meghatározottak (a kiinduló állapotból következik a végállapot, determinisztikusak), de mivel nem tudjuk végtelen pontossággal megmérni a kiindulási állapotot, ezért nem tudjuk tetszőlegesen távoli időpontra kiszámolni hol lesz akkor a rendszer.
Egy kicsit leegyszerűsített példa: van egy dobozunk, aminek két fala között oda vissza pattog egy labda (tegyük fel, hogy ez végtelenségig mehet). Ha tetszőleges időpontban ránézünk a labdára akkor az a dobozon belül van valahol, de kívül nincs (most felejtsük el a kvantummechanika viccelődéseit). Azaz mondjuk az 1 méter hosszú dobozban 0 és 100 cm között lehet. Amikor elindítunk egy stoppert akkor indul a labda az egyik faltól. Ha sebességét egy tizedesjegy pontossággal tudjuk megmérni, az azt jelenti 10% bizonytalanságunk van sebességét illetően (mert a második tizedesjegyben bizonytalanok vagyunk). Ha a labda sebességére 1m/s-ot mértünk akkor tudjuk, hogy 1 másodperc múlva valahol a doboz másik falánál lesz és 2 másodperc múlva, valahol a kiindulás környékén. De van 10% bizonytalanságunk, tehát a labda 2 másodperc múlva egy 20cm-es szakaszon bárhol lehet. Ez azt mondja, hogy 10 másodperc múlva akárhol lehet a dobozban. Ha pontosabban mérünk, mondjuk 2 tizedesjeggyel akkor is eljön az az idő, amikor a labda bárhol lehet (ez példánkban 100 másodperc múlva következik be). Akármilyen pontosan is mérünk mindig eljön az az idő amikor fogalmunk sincs arról hol van a labda, pedig mozgása determinisztikus, követi a fizikai törvényeket. Ha dobozunkban nem 1 hanem 2 labda van akkor a kölcsönhatások miatt még hamarabb bekövetkezik, hogy nem tudjuk ki hol van. Minél több a rendszerben a kölcsönhatás annál hamarabb következik be, hogy nem lehet tudni a kiindulásból, hogy milyen állapotban lesz a rendszer később.



A káoszelmélet komoly tudománnyá fejlődött, komplex matematikai fegyvertárral. Egyik fontos eredménye az, hogy megfigyelve, hogy a rendszer a lehetséges állapotok közül melyeket veszi fel és milyen útvonalakon (trajektóriákon) halad végig a lehetséges

állapotok között, következtetéseket lehet levonni arról hány meghatározó eleme lehet a rendszernek és ezek hányféle módon hatnak kölcsön.

De hol itt a homeosztázis?

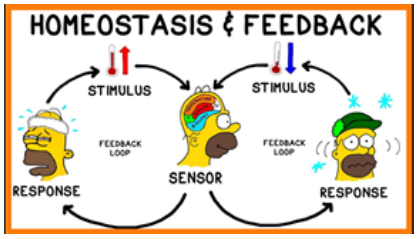
Türelem, egy hatalmas épületnek komoly alapokat kell ásni. Ezzel szerencsére meg is vagyunk. De hogy ne legyen emészthetetlen a mai bejegyzés, no meg mindneki izgatottan várja hova futunk ki, a földszintet és a tetőt a következő részben építjük fel.

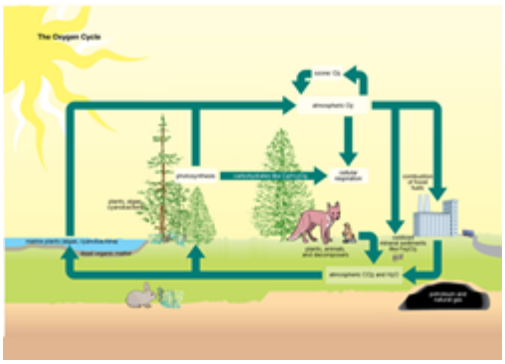
Állandó, Változó, változó állandóság és állandó változás. A Homeosztázis fogalma II.

No most fogunk eljutni a belső egyensúlyig (Ommmm).

A fizikai rendszereknek egy igen speciális csoportja létezhet és ezért létezik is, mely utazásunk szempontjából a legfontosabb. Ezek is változó (dinamikus) rendszerek, de ellentétben a kaotikus rendszerekkel, ha valamilyen hatás kitéríti őket eredeti állapotukból akkor beindulnak olyan folyamatok, amelyek visszaterelik őket az eredeti állapot felé. Ezeket hívják homeosztatikus rendszereknek.

Ezt a viselkedést, azaz a homeosztázisra (belső egyensúlyra) való törekvést elsősorban az élőlények mutatják. Számos olyan anyagcsere és viselkedési folyamattal rendelkeznek, melyek a túlélést biztosító állandósághoz elengedhetetlenek: hőmérséklet szabályozás, vércukorszint szabályozás és vízháztartás szabályozás.





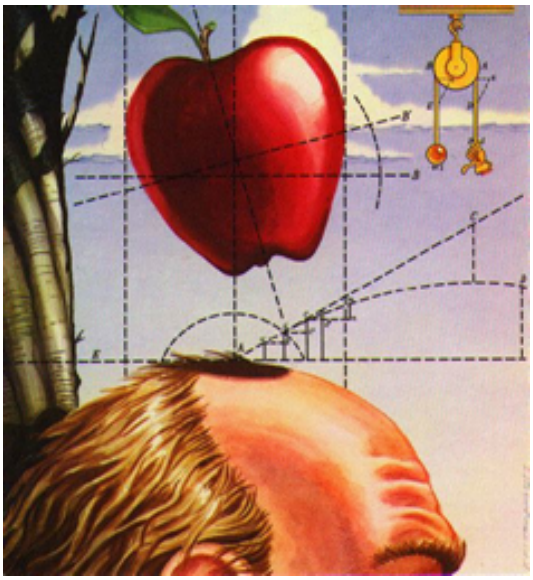
De néhány homeosztatikus folyamatot a Föld is mutat. Például: ha erős a napsugárzás, akkor az elpárolgó víz felhőket alkot, amelyek pedig visszaverik a napfényt és csökkentik a napsugárzást, ezáltal a Földfelszínre jutó hőmennyiséget. Sok ilyen folyamatnak az élővilág is fontos eleme. Ezeket a folyamatokat megfigyelve alkotta meg James Lovelock és Lynn Margulis a Gaia – Földanya elméletet, mely azt mondja ki, hogy a Földön azért alakulhatott ki és maradhatott fenn az Élet, mert kezdetben olyan geológiai, majd később olyan biológiai-geológiai folyamatokat mutatott fel, melyek a Föld állapotváltozóit az élet fennmaradásához alkalmas értékek között tartják.

Azt, hogy az élőlényekre jellemzőek a belső környezet aktív beállításának folyamatai Claude Bernard írta le 1849ben. A homeosztázis fogalmat pedig Walter Bradford Cannon alkotta meg 1926-ban.

Hogy a Föld már az élet megjelenése előtt homeosztatikus folyamatokat mutatott, az a puszta szerencse eredménye. Úgy szerveződtek geológiai, meteorológiai kölcsönhatások,

hogy kiegyenlítették egymást. De mondhatjuk azt is, hogy azért vannak ezek a Földön, mert nekünk, élőlényeknek, tudatos embereknek nem lett volna lehetőségünk megjelenni egy ilyen tulajdonságokat nem mutató bolygón (antropikus elv).

Azt, hogy az élőlények homeosztatikus folyamatokat mutatnak már a természetes kiválasztódás eredménye, azaz az evolúció terméke (amiben van persze jócskán véletlen is). Daniel Dennett, Freedom evolves (A szabadság kifejlődik) című könyvében zseniális képben mutatja be az élő rendszerek egyik alapvető trükkjét, az elkerülést, mely a homeosztázis biztosításának egyik elegáns módja. A könyv a determinizmus (a fizikai törvények által szigorúan meghatározott viselkedés) és a szabad akarat látszólagos ellentmondásának feloldásában csúcsosodik ki, szóval fogunk még vele találkozni.



A példában ülünk Newton almafája alatt, amiről leszakad egy alma és a fejünk felé kezd esni. A gravitáció kérlelhetetlen törvényei szerint a fejünkre kell essen. De mivel mi szemmel és aggyal rendelkező élőlények vagyunk, akik mozgásra is képesek, amikor látjuk, hogy az alma megindul, felugrunk, félrelépünk, és ezzel elkerüljük, hogy a fejünkre essen. Hoppá! Minden determinisztikus, mégsem esett fejünkre az alma! Ezt annak köszönhetjük, hogy azon őseink éltek túl az evolúció során, akikben kialakultak olyan rendszerek, melyek képesek voltak a környezet hatásait elkerülni, homeosztázist biztosító folyamatokat fejlesztettek. Dennett azt hangsúlyozza, hogy az élőlényekben elkerülő rendszerek fejlődtek ki az evolúció során, hogy testi épségüket egy változó környezetben is képesek legyenek megőrizni. Enélkül nem élnének túl! Ezekből, szervezetük szerveződési szintjein számtalan van pozitív és negatív visszacsatolás formájában, kezdve a baktériumok lacZ operonjától mely érzékeli, ha feldolgozható cukor jelenik meg a környezetben és elkezdi ennek feldolgozó enzimjét termelni, folytatva az izzadással, mely párolgás útján hűti testünket, ha meleg van vagy komoly fizikai munkát végzünk és befejezve agyunkkal, mely az energiaárak emelkedése hallatán födém hőszigetelésre sarkall minket.

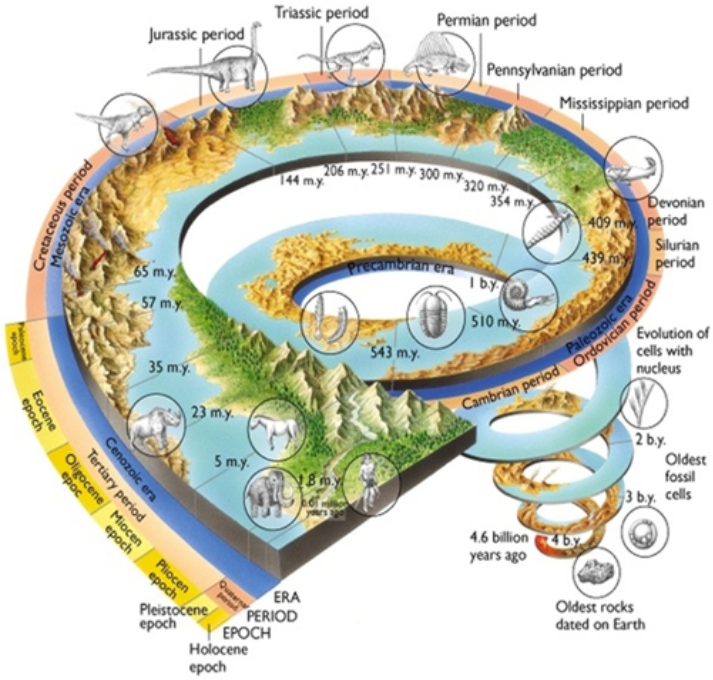
Ezen az egész kacifántos, nem is az ókori görögöknél, hanem a prekambriumban kezdődő történeten azért sétáltunk végig, mert agyunk homeosztázisunk biztosításának egyik legkifinomultabb szerve. Az #agyséta során majd végigmegyünk az agy szerveződésének 4 szintjén. Mint látjuk majd mindegyik szinthez tartozik egy-egy, egyre magasabb szintű homeosztázist biztosító funkció. Az idegsejtek reflexeket, egyszerű elkerüléseket képesek végrehajtani. A kis hálózatok már egyszerű döntéseket tudnak hozni. A hálózatokból összeálló agykérgi területek modellezni és megjósolni képesek a világot, ezáltal a homeosztatikus folyamatokat felkészítik a jövőre. Végül az agykérgi területek kölcsönhatásának térben és időben precízen szervezett összjátéka a tudatosság és a gondolkodás képességét hozza létre, melyek egy igen kifinomult előrejelző és tervező lehetőséggel testünkön túlra is kihelyezi a homeosztázis biztosítását.
Túllépünk az egyénen. A társadalomban élő emberek technológiával, törvényekkel és szervezetekkel terjesztik ki a homeosztázist egyre nagyobb területekre. A búvárok oxigén palackja, az űrhajósok űrruhája és a sarkkutatók pehelykabátja kiterjeszti azt a teret, ahol megélhetünk, hiszen magunkkal visszük mesterséges, homeosztatázist biztosító rendszereinket. Ha innen nézzük az Alapvető Emberi Jogok között számos van, ami homeosztázisunkat hivatott szavatolni: az élelemhez, lakhatáshoz, neveléshez, kultúrához való jogok.

Kérdés: Milyen élettelen homeosztatikus megoldásokat ismertek? Milyen szinteken jelennek meg még egyensúlyt biztosító rendszerek?

Jó gondolkodást!

A korai evolúció és a többsejtűek kialakulása

A mostanában elhanyagolt #agyséta rovat elkövetkező bejegyzéseiben azt járjuk körbe, hogy milyen evolúciós hajtóerők hatására és hogyan alakultak ki az idegsejtek és ettől miért lett jobb az állatoknak.

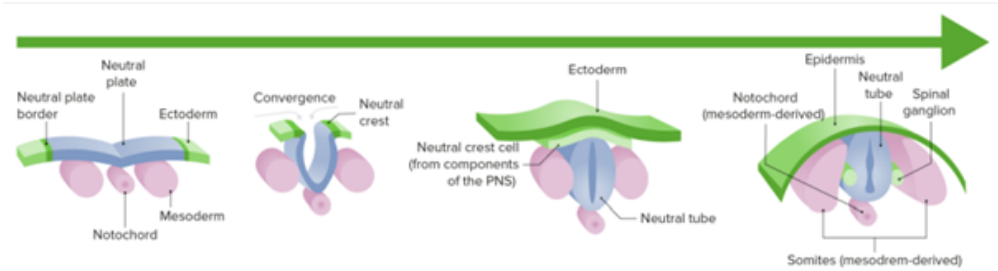


Az élet fejlődése. A bonyolódás sebessége egyre gyorsult. Az első sejtmaradványokat 3 milliárd éve találták. A gerincesek teljes evolúciója az utolsó 400 millió évben lezaljott.

Az élet története igen hosszú. A Föld 4,54 milliárd éves, az óceánok 4,5 milliárd éve jelentek meg. A jelenlegi becslések alapján az élet már nem sokkal ezután, 4,41 milliárd éve megjelenhetett, de 3,465 milliárd éve már egész biztosan kialakultak az első egysejtű élőlények. Ezután sok-sok száz millió évig nagyon lassan haladtak a dolgok. 2,1-1,7 milliárd évvel ezelőtt megjelentek a sejtmaggal rendelkező sejtek, az eukarióták, és közöttük kialakultak az endoszimbióta mitokondriumokkal felszerelt egysejtű „állatok” (és „gombák”) valamint a mitokondriumokkal és színtestekkel (chloroplasztokkal) bíró egysejtű „növények”. Ekkor begyorsult a fejlődés, mivel a sejtmag bonyolultabb genetikai szabályozási mechanizmusokat tett lehetővé. Az evolúció hatékonyabban kezdhetett el kísérletezni, illetve több üzemanyag is állt a rendelkezésére, mert az endoszimbionták hatékonyan gyorsították az eukarióták anyagcseréjét. Azért még így is 1 milliárd évet kellett várni az első többsejtűek felbukkanására, ami azután következett be 650 millió éve, hogy megúsztuk, a Föld örökre hógolyóvá fagyjon. Ezek kezdetben csak hasonló sejtekből álló kupacok, majd kicsit később testüreggel rendelkező szivacsszerűségek voltak. Ezek a jószágok legtöbbnyire csak lebegtek, táplálékot szűrögettek a tengerből, sok érdekeset nem csináltak (meg se kövesedtek). Aztán valami történt és mint az 575 millió évvel ezelőtti Avalon robbanást megörökítő ausztráliában talált Ediacara fauna, majd az ezt követő Kambriumi robbanást megőrző kanadai Burghess pala bemutatja, hihetetlen sebességgel alakultak ki a bonyolultabb életformák. Megjelentek a lábak, karmok, szemek, állkapcsok. Ezeknek azonban csak akkor van szerepe, ha az állat tudja merre kell menni, mit kell elkapni és mi elöl kell menekülni.

Az idegrendszer kialakulása tehát alapvető lépése volt a testszerkezet bonyolódásának. Az

idegrendszer meghatározó szerepe meg is őrződött az alapvető embrionális folyamatokba kövesedve.



A velőcső lefűződése és a gerinc kialakulása a fejlődő embrióban.Az embrió háti részén a felszínt borító ektoderma (zöld) közepén egy csíkban kialakul a velőcső (lila, első ábra), mely bekerül az embrió belsejébe (2, 3 ábra) és megindítja a gerinc és további szervkezdemények kialakulását (rózsaszínek)

Egy megtermékenyített petesejtből kialakuló zigóta (egyszerű soksejtű sejtcsomó) felszínén lemezbe kezd tömörödni az osztódó sejtek egy része. Ezek alkotják majd az élőlény kültakaróját, bőrét, szaknyelven az ektodermát (hám), az első csíralemezt. Az első struktúra, ami ezeken a lemezeken kifejlődik az egy redő, az alján egy hosszanti mélyedéssel. Ez a hosszú mélyedés lefűződik, ebből lesz a velőcső, a központi idegrendszer alapja és őse. Ekkor az állatkának még se bele, se izmai, se csontjai nincsenek. Ezek kialakulását majd a velőcső és az ektoderma (hám) összjátéka fogja kialakítani. A gerinc őse a notochord (a harmadik csíralemez, a mesoderma egyik első eleme) a velőcső alatt kezd kialakulni a belet alkotó entoderma (második csíralemez) pedig ennek túloldalán. Az idegsejtek és bőr hámsejtjei tehát igen közel állnak egymáshoz kialakulásukban és genetikai szabályozásukban. A hámsejtek bizonyos fajtáinak külvilág felé eső felszínén csillók találhatók. De találhatunk csillókat érzéksejteken is, sőt sokszor találtam az elektronmikroszkópos vizsgálódásaim során olyan agykérgi idegsejtet, amely „megfeledkezett" arról, hogy ő már nem hámsejt és néhány csilló fityegett a sejtmagja közelében.
De miért alakultak ki többsejtű szervezetek és mi történt a többsejtűség megjelenésekor?

Ha egy élőlény többféle feladatot tud megoldani, több vagy nehezebb környezetben is hatékonyan meg tud élni és ezzel előnyre tesz szert versenytársaival szemben. Egy sejt a genetikai szabályozás, a sejtfelépítés megkötései és a sejten belüli jel-átvivő rendszerek kis száma miatt egyszerre viszonylag kevés feladatnak tud jól megfelelni és kevés ingerre tud megfelelően reagálni. Az például, hogy egy sejt ellenálló legyen, ellentétes kívánalmakat támaszt azzal, hogy egy sejt hatékonyan tudjon tápanyagot felvenni. Az egyik esetben egy erős, ellenálló sejthártya szerkezetet kell építeni a másikban egy olyat, mely tele van anyagokat átengedő csatornákkal. Hasonlóan ellentétesek a merevség és a rugalmasság, alakíthatóság molekuláris szerkezeti elvárásai. Ezt a problémát az evolúció úgy oldotta meg, hogy míg korábban a sejtosztódás során (a szaporodás egyetlen formája) a két utódsejt egyforma tulajdonságokkal bírt és szétvált, a többsejtűség kialakulásakor a sejtek összetapadva maradtak és eltérő tulajdonságokat kezdtek el mutatni. A feladatmegosztásból az együtt maradt sejtek mindegyike előnyöket szerzett, igaz ezzel elköteleződött a közösségi élet felé (önmagában már nem lenne életképes), kialakult egy magasabb szintű életforma az egyed.

A feladatmegosztás során a felszínen maradó sejtek más szerkezeteket építettek és eltérő anyagcsere folyamatokat kezdtek el használni, mint a mélyebben fekvő sejtek. Ehhez persze szükség volt arra, hogy a megfelelő szabályozó rendszerek és az őket megvalósító genetikai szabályozó mechanizmusok, illetve szerkezetet és működést megvalósító fehérjék ki is alakuljanak. Megjelentek a sejtfelszínen a különböző sejt-azonosságot mutató molekulák,



aminek az alapján két összeérő sejt jelezni és érzékelni tudta szomszédjának mi a feladata és hogy ő maga milyen irányba specializálódjon, milyen szakértelmet „fejlesszen”, miben legyen jó. Egy nemrég feltárt érdekes tény - hogy bár azt hisszük a sejtek feladatmegosztása csak a többsejtűekre jellemző és viszonylag késői evolúciós lépés – a baktériumok genetikai szabályozási hálózatának, génkészletének vizsgálata kimutatta, hogy az egyedi sejtfunkciók kialakulásának jelensége már itt megjelent.
Egy élőlény több ezer gént tartalmaz. A genetikusok igáslova a kóli baktérium (Eschericia coli) kicsit többet, mint 4.000-et. Az ember genomja 24.000 fehérje kódoló gént és 34.000 olyan szakaszt tartalmaz, ami részt vesz a szabályozásban. Egy fehérjét kódoló gén nem csak a fehérjét leíró információt hordozza, hanem a DNS szálon ennek környezetében olyan szakaszok is megtalálhatók, melyek azáltal, hogy szabályozó molekulákat kötnek meg be vagy képesek be vagy kikapcsolni az adott fehérje készítését. No ez az a pont, ahol nem kanyarodunk el a szakadék fele és nem megyünk bele a hihetetlenül érdekes genetikai szabályozás mechanizmusaiba, mert másfelé vezet az utunk (de azért lásd nemrégiben megjelent #agyhírek rovat cikkünk felvezetőjét). A lényeg, hogy a gének szabályozó elemei egy hihetetlen bonyolult hálózatot alkotnak. A hálózat-elemzés módszereit használva a biológusok kimutatták, hogy ezek a szabályozó hálózatok is nagyon korán kialakultak és az evolúció során megőrződtek. Az többféle tápanyag feldolgozására szakosodott anyagcsere alrendszerek mellett megtalálható a DNS másolás, javítás és sejtosztódás szabályozás alrendszere, a sejtet fenyegető környezeti hatásokra reagáló alrendszerek és meglepő módon már a baktériumokban megjelennek a feladatmegosztáshoz szükséges gének és szabályozó rendszerek, melyek a mozgás szabályozásában és a biofilmek kialakításában játszanak szerepet.

Hogyan alakulnak ki új funkciókat megvalósító rendszerek (gének, sejtek, szervek)?

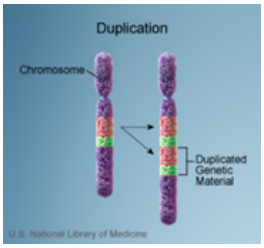
... és hozzájuk tartozó eltérő helyzetben bekapcsolódó szabályozó rendszerek?
Ha van otthon egy bögrénk mit csinálunk vele? Iszunk belőle. Ha van 4? A család minden tagja iszik egyből. És ha 42?



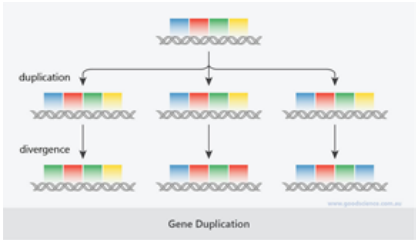
Akkor 4ből iszunk, 4 esetleg a mosogatógépben van, de a többiben a gyerekek ceruzáit tartjuk, virágokat ültetünk beléjük, vagy a háziállatokat itatjuk belőle.

Az élőlények génjei az információt hordozó DNS molekulán, illetve ennek sokszorosan felcsavarodott változatában a kromoszómákon egymás után sorban helyezkednek el, mint

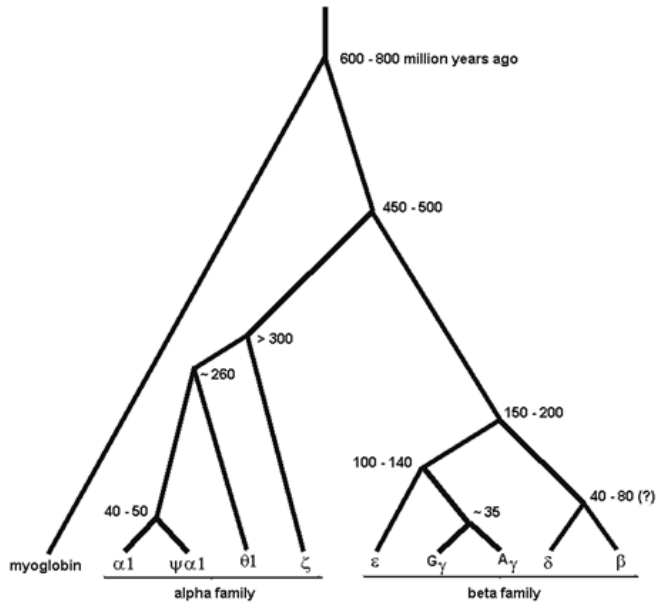
egy könyvben a mondatok. A sejtosztódás során gyakran előfordul, hogy egy gén hibásan másolódik le. Ha egy fontos génben keletkezik hiba az élőlény elpusztulhat, mert alapvető anyagcsere vagy testfelépítési funkció esik ki. Ritka esetben a gén megváltozása egy az adott környezetben hatékonyabban működő gént eredményez, ez lassan hozhatja előre az evolúciót. De létezik egy másik típusú hiba, amikor is egy DNS szakasz és a rajta lévő gén vagy gének, illetve szabályozó területek egymás után többször íródnak bele a genomba.



Mint amikor egy fáradt kódexmásoló elfelejt lapozni és ugyanazt a szöveget kétszer másolja át. Ennek hatására új lehetőségek nyílnak meg az élőlény számára. Amíg egy génből egyetlen példány van nagyon kell „vigyázni rá”, hiszen károsodása vagy funkciójának megváltozás veszélyes lehet. De ha az génből több van akkor a gén egyik példánya továbbra is változatlan marad, a többin viszont szabadon kísérletezhet az evolúció. Új funkciókat, új szabályozásokat találhat ki egy gén számára, idővel a gén megváltozik, mást csinál. Ha egy megsokszorozódott DNS szakasz nem egy funkcióért, hanem más gének szabályozásáért felelős elemeket tartalmaz az élőlényben, akor új sejttípusok, vagy testtájak alakulhatnak ki.



Így alakultak ki például az eltérő molekulákat érzékelő szaglóreceptor molekulák, a vérben oxigént szállító hemoglobin molekula magzati és felnőtt változatai, a különböző típusú ideg-, izom-, stb-. sejtek, valamint az ízeltlábúak ízei, amelyik egyikén láb, a másikán csáp nő (a rovarokén 3 pár láb, a pókokén 4 pár a rákokén meg 5 pár). De, mint majd látjuk, az agy evolúciója során is alakultak kis hasonló megkettőződés folytán eltérő feladatokat megoldó agyterületek (a mozgás vagy tárgy érzékelésért felelős látókérgi területek, vagy a külvilágot eltérő aspektusból megértő bal és jobb agyfélteke).



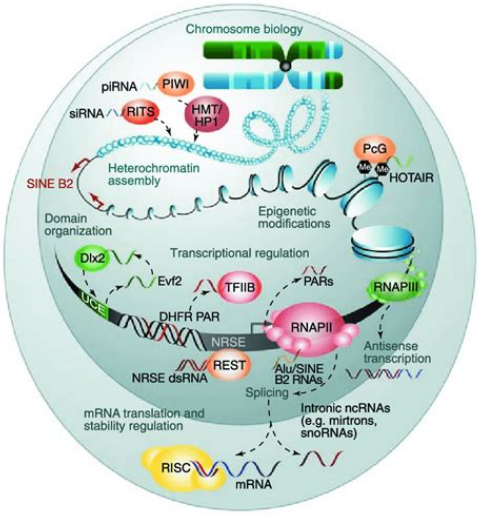
Az oxigénkötő globin fehérjecsalád génjeinek leszármazása. Ide tartoik a bálnák izmaiban oxigént raktározó mioglobin, illetve az eltérő magzati és felnőtt vérben található eltérő tulajdonságú hemoglobinok.

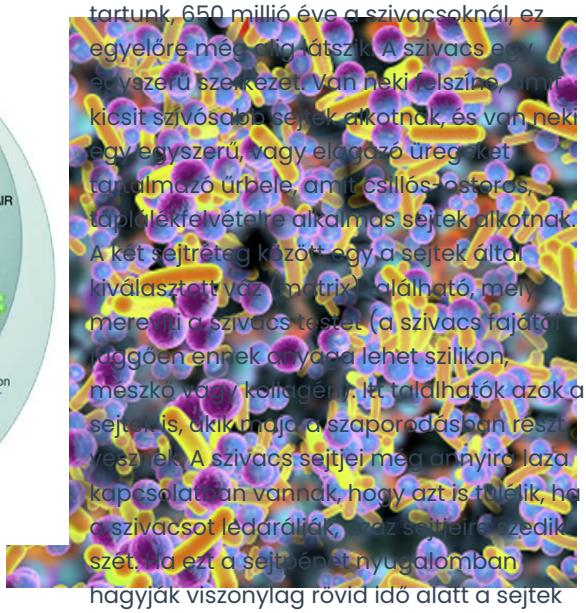
A biofilmek ragadós trutyijától a bukfencező hidráig

A génduplikációt megelőző bejegyzésben a biofilmekig jutottunk el.
De mi az a biofilm? Nem David Attenborough műsora, hanem egy vagy több fajta egysejtű élőlény által kialakított szívós bevonat. A biofilmek jelen vannak mindenhol, ahol az ember nem takarít rendesen, a fogunkon a lepedék, majd az ebből kialakuló fogkő biofilm, a zöldes-fekete trutyi a nedvesedő házfalon biofilm, a mosdókagyló falára tapadt szürke, zsíros réteg biofilm, de az érfalakon lerakodó, a rettentő koleszterin által okozott meszesedés is az.

Arra, hogy a biofilmek ravasz dolgok az orvosok és mikrobiológusok kezdtek rájönni amikor azt találták, hogy a Petri csészében szabadon úszkáló baktériumokra remekül ható antibiotikumok a betegekben nem olyan jól működnek, mint kellene. Kiderült, hogy a baktériumok koránt sem egyedül kószáló, önfejű lények, hanem ravaszan csoportosulnak, telepeket hoznak létre, melyek felszínén más tulajdonságokkal rendelkező egyedek találhatók, mint a belsejében. A kívül található sejtek erősen kapcsolódnak egymáshoz és egy nyálkás ragadós bevonatot választanak ki, melybe beleragadnak a károsító dolgok, például az antibiotikumok vagy az immunrendszer rendőrei a fehérvérsejtek, de átszűrődnek rajta a tápanyagok, amiket a csomó belsejében található sejtek testük építésére, osztódásra használnak. A felszíni sejtek tehát nem szaporodnak, feláldozzák magukat azért, hogy a többi (közös anyasejtből származó, rokon) sejt hatékonyan szaporodni tudjon.

No de mi köze mindennek az agyhoz? A valódi sejtmagvas élőlények, jóval bonyolultabb genetikai szabályozási lehetőséggel rendelkeznek, mint a baktériumok, bár ahol most





tartunk, 650 millió éve a szivacsoknál, ez egyelőre még úgy látszik. A szivacs egy egyszerű szerkezet. Van neki felszíne, amit kicsit szívósabb sejtek alkotnak, és van neki egy egyszerű, vagy elágazó üreget tartalmazó űrbele, amit csillós ostoros, táplálékfelvételre alkalmas sejtek alkotnak. A két sejtréteg között egy a sejtek által kiválasztott vázmátrix található, mely merevíti a szivacs testét (a szivacs fajától függően ennek anyaga lehet szilikon, mészkő vagy kollagén). Itt találhatók azok a sejtek is, akik majd a szaporodásban részt vesznek. A szivacs sejtjei még annyira laza kapcsolatban vannak, hogy azt is túlélik, ha a szivacsot ledarálják, az sejtjeire szedik szét. Ha ezt a sejtpépet nyugalomban hagyják viszonylag rövid idő alatt a sejtek kiválogatják magukat és egy új, megfelelő szerkezetbe rendeződő szivacs áll össze. A sejtek felszínén található molekulák segítenek abban, hogy melyik sejt melyikkel és milyen elrendezésben tapadjon össze. Ha két különböző szivacsfajt darálunk össze akkor a két faj sejtjei különválnak egymástól és kialakítják saját szerkezetüket. Ez a kísérlet azt bizonyítja, hogy az egyes sejtek fajukra jellemző felszíni, úgynevezett sejt adhéziós molekulákat fejeznek ki, amiknek segítségével a megfelelő sejtek megfelelő helyen tapadnak össze. Ezekből a molekulákból fejlődnek majd ki a szövetek kialakításáért felelős rendszerek a magasabb rendű állatokban. Az evolúciós fán egyre feljebb haladva a megjelenő gének igen jelentős hányada az immunrendszer és az idegrendszer sejtjeinek felszínén megjelenő összekapcsolódást és sejtazonosságot kifejező, adhéziós molekula, illetve a sejtek kölcsönhatásában résztvevő érzékelő, receptor molekula (ezek egy része mindkét feladatot ellátja).



A szivacs nem egy zseni, csak ül, szűrögeti a vizet, és nagyon rosszul érzi magát, ha egy másik szivacs vagy egy kő elzárja a külvilágtól. Nem tud odébb menni, mert egyrészt nincs mivel, másrészt nem érzi merre is lehetne. Ez az ostoba üldögélés folyt közel 50 millió évig,

mikor is megjelentek a fésűsmedúzák, majd újabb 10 millió év múlva a csalánozók (590 millió éve, ide tartoznak a hidrák, korallok és medúzák). Ezek az állatok „találták fel" az idegrendszert és a mozgást (a fésűsmedúzák testfelszíni csillósorokkal eveznek előre, a csalánozókat izmaik mozgatják). Ehhez az kellett, hogy szivacsősök sorában kialakuljanak véletlenszerűen a felszínen lévő (kültakaró, hám) sejtekben olyan fehérjék, amelyek a fényt vagy a tápanyag ízét érzékelték. A szivacs mélyén, pedig kialakultak olyan sejtek, amelyek összehúzódásra lettek képesek (izomsejtek). Ahhoz, hogy az állat hatékonyan mutasson valamiféle reakciót még annak is ki kellett alakulnia, hogy az érzék és mozgató sejtek egymással kommunikálni tudjanak. Az evolúciós mechanizmust elvető kreacionisták kedvenc érve az, hogy „De hát az a sok bonyolult dolog nem alakulhatott ki csak úgy, kicsi a valószínűsége"! Hát nem is egyszerre alakult ki, hiszen, mint az evolúcióról szóló bejegyzésben írtuk, az evolúció vak, nincs célja és véletlenszerűen működik. Egyetlen dolog számít, hogy a változás eredményeképpen az egyednek több utódja lesz-e, mint másnak. Az 50 millió év buta üldögélésbe bőven belefért, hogy mondjuk csak az izomsejt alakuljon ki, vagy csak az érzéksejt. Mindkettő előny már önmagában is. Ha a szivacs izmaival tudja belső üregét tágítani-szűkíteni, függetlenül attól mi van a környezetében, máris hatékonyabban szűri a vizet, mint ha csak a csillóival-ostoraival hajtaná, több táplálékot szűr ki és több utódja lesz. Ha csak érzi a felszíni sejtjeivel a környezet tápanyagtartalmát és erre megfelelő géneket kapcsol be, az is javítja a túlélését. Ez a két véletlen valószínűleg sokszor kialakult, de mivel külön-külön kevésbé hasznosak, mint együtt, a továbblépéshez az kellett, hogy valamelyik tulajdonság után a másik is kialakuljon egy egyedben. Utána még a harmadik nagy lépésnek - az érzéksejtek összekapcsolódásának a mozgató sejtekkel – is be kellett véletlenül következnie, hogy kialakuljon az első - érzékelő és mozgás válaszokat mutató, a legegyszerűbb idegsejtekkel rendelkező - ős-csalánozó.



Hihetetlen előnye volt a környezetében üldögélő szivacsokkal szemben, hiszen odébb tudott menni, ha valami elválasztotta a táplálékforrástól, sőt idővel meg is tudta keresni a táplálékdús helyeket. Arról ne is beszéljünk, hogy hamarosan megtalálta és megette a nála kisebb és menekülésre képtelen élőlényeket. Megjelentek az első ragadozók és beindult az evolúciót gyorsabb fokozatba kapcsoló fegyverkezési hajsza. Ne felejtsük, az élet megjelenésétől a sejtmagvasokig 2 milliárd év telt el! Innen már „csak" 1 milliárd évet kellett várni az első soksejtűre. A szivacsokig 150 millió év alatt jutott el a törzsfejlődés. A csalánozókra már csak 50 millió évet kellett várni, az összetett testű gerincesek pedig újabb 40 millió év múlva már ki is alakultak. Azaz az idegsejtek megjelenése után kialakult összetettebb életformák az élet evolúciótörténetének utolsó 1/7-ed részében robbantak be az állandó küzdelembe.

Föld kialakulása	Óceánok	Élet talán	Élet biztosan	Sejtmagvasok	Első többsejtűek	Szivacsok	Bordásmedúzák, Csalánozók	Gerincesek elválása	
4.54	4.50	4.41	3.465	2.1-1.7	0.800	0.650	0.600-0.590	0.560	

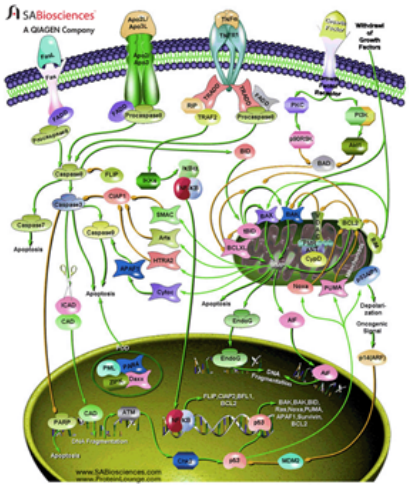
Köpönyegből messzelátó, az idegsejt és a környezetre adott válasz feltalálása

Most, hogy átvettük azt, hogyan, miért és milyen mechanizmusokat felhasználva zajlott le az idegrendszer kialakulása, itt az ideje, hogy a lényegre térjek. Milyen lépésekben

alakult az állatot védő hámsejt ingerület felvevő és szállító idegsejtté.

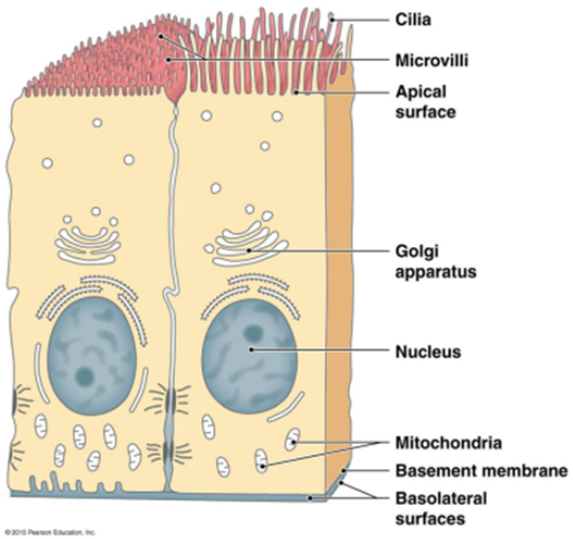
Először is a vízben élő állatok hámsejtjei nem csak védik az állatot a környezetétől, hanem valamilyen szinten a táplálék megtalálásában, oldott anyagok felvételében is szerepet játszanak (az elszarusodó, páncél-szerű hám a vízi ragadozók, illetve a szárazföld kihívásai ellen véd majd jóval később). Már a legegyszerűbb egysejtűek a prokarióták, (Eubactériumok és Archebaktériumok) valamint az egysejtű eukarióták (Protisták, Növények, Gombák és Állatok) sejtjei is érzékelik a külvilágot és reagálnak annak változásaira. Ingerek hatására gének kapcsolódnak ki vagy be, illetve a sejtet mozgató ostorok vagy csillók mozgása megváltozik. A külvilág jeleinek felfogására számos fehérjecsoport fejlődött ki, melyek a sejt felszínén ülnek és azáltal, hogy bizonyos molekulákat megkötnek érzékenyek ezek jelenlétére, mennyiségére. De miután felfogták a jeleket, az információt valahogy tovább is kell juttatni a sejt többi része felé, hogy arra valamiféle válasz következzen be.

Erre alapvetően 2 módszert használnak a sejtek: vagy valamilyen apró molekulát szabadítanak fel a sejt belseje felé (másodlagos hírvivők: ciklikus AMP, G-fehérjék, inositol-trifoszfát, stb) vagy kinyitnak egy apró csatornát, ami igen válogatósan pozitív vagy negatív töltésű ionokat ereszt be a sejtbe vagy ki a sejtből. Itt dolgozhat a sejt a nagyon alacsony koncentrációban jelenlevő Ca2+ ionokkal (ők másodlagos hírvivőként szolgálnak) vagy a jelentősebb mennyiségben jelen levő Na+, K+ és Cl- ionokkal. A nagy mennyiségben átáramló ionok elektromos jeleket hoznak létre egy sejt felszínén. A genetikai és anyagcsere folyamatokat inkább a lassú hatású másodlagos hírvivők útján szabályozza egy sejt, a gyors folyamatokat, mint a mozgást, pedig inkább a sejten kialakuló, gyorsan terjedő elektromos jelek szabályozzák.



A sejtfelszíni metabotróp receptorok és a másodlagos hírvivők rendszere. Az egymással keresztbe és kölcsönható másodlagos hívivő rendszerek sejtekre jellemzően kifejezett fehérjék működését befolyásolják.

Egy hámsejtnek van egy külvilág felé néző része, melyet csúcsi, apikális felszínnek neveznek és van egy az állat belseje felé néző része, melyet alapi, bazális felszínnek neveznek. Ezeken a felszíneken eltérő szerepeket betöltő fehérjemolekulák találhatók. Értelemszerűen az apikális felszínen, mely a külvilág fele néz találhatók a különböző molekulákat érzékelő fehérjék a receptorok, illetve a különböző molekulák, ionok felvételére alkalmas csatornafehérjék. A külső felszínen felvett anyagokat a sejtek a test felé néző felszínükön pedig le tudják adni. Vagy az alapon található sejthártyában elhelyezkedett csatorna és pumpa fehérjék segítségével, vagy azáltal, hogy a sejten belül kicsi sejthártya hólyagokba (vezikulák) csomagolják az anyagokat, majd a kis hólyagok az alapi sejthártyába olvadva tartalmukat a test belsejébe ürítik a sejtek közötti térbe. Ezt a lépést jól



Egy hámsejt olyan szakosodott sejt, mely az élőlény belsejét választja el a környezettől. A környezet felé mutató felszínén (apikális, csúcsi) és a szervezet felé néző felszínén (bazális, alapi) eltérő típusú fehérjéket fejez ki, hiszen ezeknek eltérő feladatokat kell megoldaniuk. Különbségek figyelhetők még meg az

eltérő sejthártya részekhez kapcsolódó sejtváz (citoszkeleton) felépítésében is. Ezeket a polarizálódásokat az idegsejtek is megőrizték. Dendritfájuk a csúcsi, axonfájuk pedig az alapi hámsejthártya tulajdonságait örökölte.

jegyezze meg mindenki, mert fontos lesz az idegsejtek jelátvitelében!
A történet másik szereplői, az izomsejtek a test belsejében találhatók és egy dologra rendezkedtek be, hogy a bennük kötegekbe rendezett izomfehérjék átrendeződésének hatására összehúzódjanak. Az összehúzódás akkor következik be, amikor a sejtbe Ca2+ ionok áramlanak be. Ez két hatásra történhet meg. Egyrészt, a sejt felszínén található, bizonyos anyagokra érzékeny receptorok, ha a megfelelő anyagot érzékelik akkor Ca2+ ionokat engednek a sejtbe, másrészt, ha a sejthártyán kialakult feszültségkülönbséget más ionok áramlása hirtelen megváltoztatja (áram folyik a sejthártyán keresztül) szintén Ca2+ lép be a sejtbe. Az izomsejtek tehát képesek arra, hogy a környezetüket érzékelve megfelelő hatásra összehúzódjanak. Ez a folyamat kezdetben lassú volt, mivel a hámsejtek és az izomsejtek nem feltétlenül helyezkedtek el egymás közelében. Ott volt például a szivacsok esetében, vagy a medúzáknál felelhető kocsonyás váz, melyen keresztül csak lassan szivároghattak az izomsejtek felé az ingert szállító anyagok.

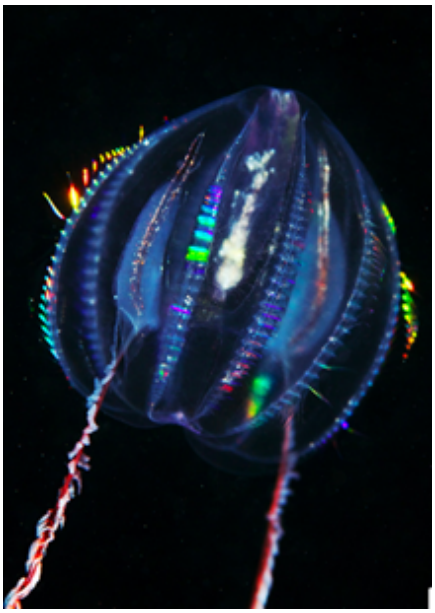
Ahhoz, hogy kialakuljon az első reflexív, amiben egy sejt a külvilágot érzékelve mozgásba hoz egy izomsejtet már „csak" az kellett, hogy a hámsejtek átalakuljanak olyan hosszan elnyújt sejtekké melyek ingerület felvevő vége (apikális felszín) megmarad a felszínen, másik vége (az alapi, bazális) pedig hosszan megnyúlik, egészen a test belsejébe az izomsejtekig. Ahol megközelítve őket és a jelátvitelben felhasznált anyagokat azok felszínére szabadítja fel, hogy aztán az izomsejtek azok azt észlelve összehúzódjanak. Így a percekig tartó lassú molekula diffúzió helyett a másodperc töredéke alatt jutott el az ingerületátvivő anyag az evolúció alatt lassan idegsejtté alakuló hámsejttől az izomsejtig.

Aki résen van, az most megkérdezi: Na jó, de a megnyúlt idegsejt egyik végéről hogyan került gyorsan az információ a másikra? Mert ehhez a diffúzió a sejten belül éppen úgy lassú, mint a sejtek között. Emlékezzünk arra, hogy már a hámsejtek is ionáramok hatására kialakuló feszültségváltozásokat használnak arra, hogy gyorsan vigyenek át jeleket. A molekulák lassú diffúziójával szemben az elektromos tér nagyon gyorsan épül fel egy sejt felszínén és viszonylag hatékonyan is terjed. Azt történt tehát, hogy a megnyúlt hámsejtből alakuló idegsejt amikor az érzékeny végén „szagot fogott", a felszínén Na^+ és K^+ ionok (illetve kevés Ca^{2+}) kezdtek gyorsan átáramlani, melynek hatására megváltozott, és a hosszú nyúlványon végig terjedt a külső és belső felszíne közötti feszültségkülönbség. Az izomsejthez tapadt végén, pedig ez a változás felszabadította a kicsi hólyagokba csomagolt ingerületátvivő anyagot, mely ráömlött az izomsejtre. Az izomsejt ezt az anyagot érzékelte, Ca^{2+}-ot eresztett magába, mely izomösszehúzódást váltott ki. Kialakult az első szinapszis! Míg az első csalánozókban ebből csak egy tucat lehetett az ember agyában 10^{15} (kvadrillió) szinapszis található.
Az idegsejtekről az izomsejtekre a jelet átvivő anyag az acetil-kolin (az angol rövidítést használjuk ezután: ACh). Ez a molekula megint emlékeztet minket arra, hogy az evolúció a lomtárban talált, régi alkatrészeket használja új célokra és/vagy hatékonyabban. Az ACh-t már a biológia „ókori görögjei" a baktériumok is használták jelátvitelre, majd a növényi és állati szövetekben is jelátvitelre használt molekula vált belőle. Nem meglepő, tehát hogy az első idegrendszeri kapcsolatokban jelen van. Mindössze itt már nem a szövetek közötti térbe szabadul fel, hogy lassan szétterjedve a környező sejtekre hasson, hanem egy jól célzott kapcsolatban, a szinapszisban, gyorsan fejti ki hatását.

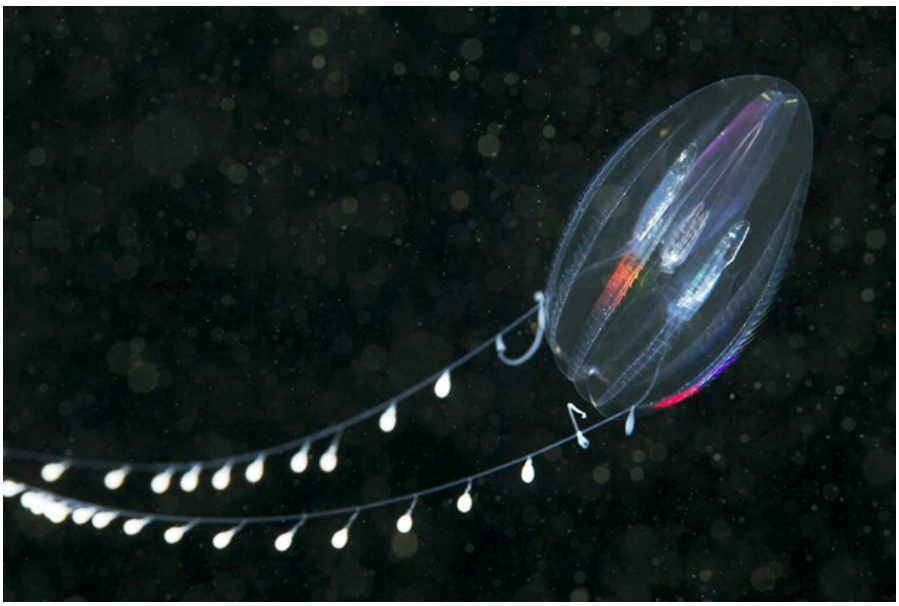
Az első idegsejtek érzékelő vége érzékelhetett mozgást, tápanyagot, hőmérsékletet vagy fényt. Az utóbbiakból alakultak ki a szemek. A legegyszerűbb idegrendszerrel rendelkező állatok a szépséges fésűs medúzák. Ezek testének négy oldalán 4 csillósor fut végig, amelyek az állatot mozgatják. Ahol a 4 csillósor találkozik az állat kupolájának tetején, található egy érzékszerv, egy kis harang, amelyben apró kvarcszemcsék ülnek 4

nyomásérzékelő idegsejt csoport tetején. Amikor az állatot a víz áramlása elferdíti akkor az alulra került idegsejtekre guruló kvarcszemcsék erősebben ingerlik azokat. Az idegsejtek jeleket küldenek az azon az oldalon elhelyezkedő csillósorhoz, mely gyorsabb evezésbe kezd és újra függőleges helyzetbe hozza a fésűsmedúzát. Hogy mire képes már egy ennyire egyszerű rendszer, azt a fényt kerülő és követő házi készítésű robotokat bemutató YouTube videó szemlélteti.

Így lett tehát a köpönyegből messzelátó. Hogy mi történt ezután azt a következő, kevésbé mesés és valószínűleg keményebb diónak bizonyuló #agyséta bejegyzések fogják bemutatni.



Bordásmedúza. Csillósorai hajtják előre, abba az irányba amit a 'feje' tetején található egyszerű egyensúlyszerv kijelöl neki.



Egy másik bordásmedúza. Gyönyörűek, nem elég belőlük.

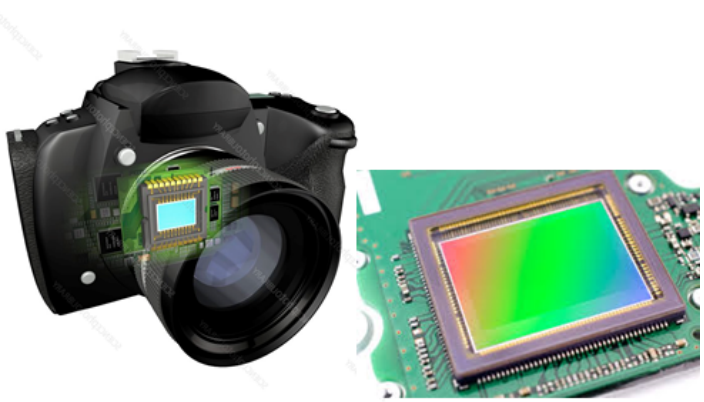
Hogyan látják az idegsejtek a világot? A kódolás trükkjei.

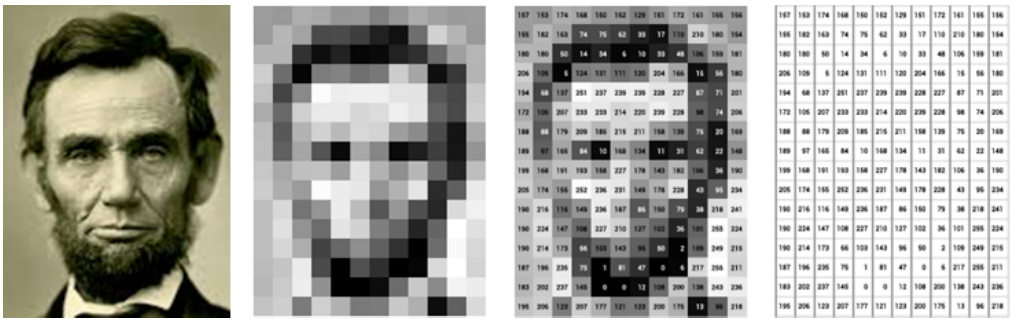
Az agyműködés megértéséhez az egyik kulcs annak megértése, hogy mi az a kódolás, mi az hogy reprezentáció? Hogyan képződik le a világ, a feladatok és a megoldások az agyban. Ezt járjuk most egy kicsit körül.
A dolog aktualitását az adja, hogy Újfalussy Balázs (ELKH-KOKI) és Orbán Gergő (ELKH-Wigner) meglehetős sikerrel járták körbe azt a kérdést: „hogyan kódolja az egér agya a lehetséges döntések bizonytalanságát", ugyanis munkájuk eredményét az eLife című

online folyóirat megjelentette. A KOKI weboldalán írunk a cikkről. Azonban úgy gondoltam mielőtt valaki azt elolvasná érdemes egy kis alapozást tartani.



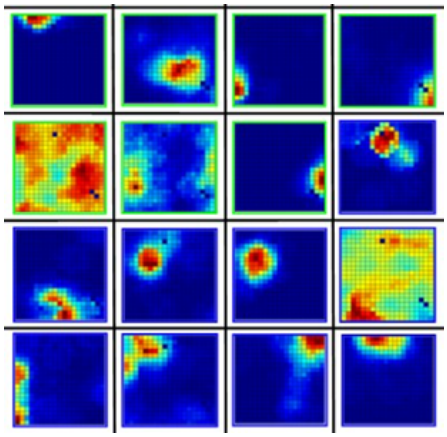
Ha barátunk fejére készül szakadni a virágállvány elkiáltjuk magunkat: Vigyázz! Ez hasznos, de nem túl informatív. Mire vigyázzon, merről jön a baj? Bizonyos majmok és madarak ennél messzebbre jutottak, eltérő vészjelzést adnak a földön támadó kígyó vagy a levegőből támadó ragadozómadár jelzésére. Valamit, egy azt helyettesítő jellel illetnek. A jelek bonyolításával a leírandó dolgok is bonyolultabbak lehetnek. Idegsejtjeink működési mintázatai is ilyen jelentéseket hordoznak. Sok sejt együtt bonyolult dolgokat képes jelezni.
A legkönnyebben emészthető példa hogyan kódolják a szemünk recehártyájában (retina) található csapok és pálcikák amit éppen látunk. Körülbelül ugyanúgy, mint egy digitális fényképezőgép. A fényképezőgépben a lencserendszer a tárgyról érkező képet a CCD kamera felszínére vetíti. A kamera minden egyes pixelére a kép egy pontja jut és a beérkezett fény mennyiségével arányos elektromos jel keletkezik. A képet a CCD chip tehát elektromos jelszintek táblázatává alakítja, amely pedig a memóriakártyán számok táblázataként raktározódik. A külvilág képét tehát egy szám-mintázat le tudja írni.





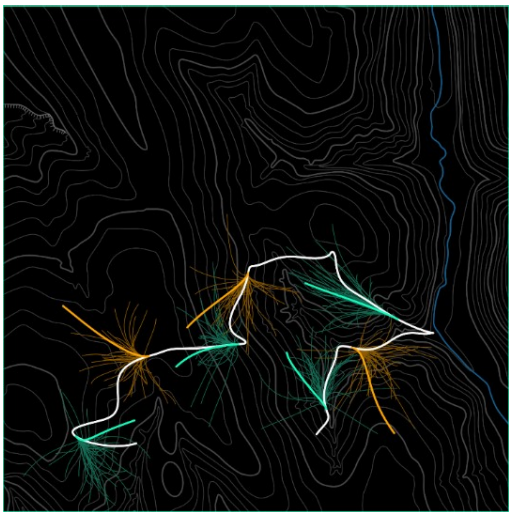
Ugyanígy, szemünkben az egyes csapok és pálcikák aktivitásmintázata reprezentálja (írja le, kódolja) a külvilágot. Ez egy nagyon egyszerű reprezentáció. De ahogy végigsétálunk agyunkban a látóingert szállító idegpályákon, az információ több helyen is átkapcsolódik. Először a thalamusba kerül, onnan az elsődleges látókéregbe, majd onnan egyre magasabb látó és asszociációs agyterületekre. Az átkapcsolások során az információ mindig kicsit másképp kódolódik (új nyelvre fordítódik). A V1-ben (elsődleges látó, azaz Vizuális kéreg) található egyes idegsejtek akkor kapcsolódnak be (aktiválódnak) ha a retina

megfelelő területén megfelelő irányú (ferde, vízszintes, függőleges) sötét/világos határvonalat érzékelnek. Ennek felismeréséért kapta Hubel és Wiesel az 1981-es élettani Nobel díjat. A sejteknek azt a tulajdonságát, hogy a látótér egy bizonyos pontján egy bizonyos irányú vonalra érzékenyek, érzékelő mezőnek (receptive field) nevezik. Ahogy a látókérgekben a képfeldolgozás előrehalad, ezek az érzékelő mezők is egyre bonyolultabbak lesznek és függetlenné válnak az aktuális kép tónusától, színétől, fényerejétől, a kép állásától. A magasabb szinteken élek helyett sarkokat, szögeket, formákat érzékelnek a sejtek. A többi érzékszervből is hasonló feldolgozási lépcsőfokokon keresztül halad végig az információ. Egy ponton a különböző érzékszervekből érkező információk összefutnak és egy, az összes érzéket összefogó élménnyé alakulnak. Ez a terület a hippokampusz, az itt található idegsejtek érzékelő mezői különböző élményeket, helyzeteket, szituációkat azonosítanak. Én most épp a szobámban ülök, már este van, sötét, a radiátor kellemesen meleg, érzem a készülő vacsora illatát. Ezt mind az agykérgem részét alkotó hippokampuszom sejtjei kódolják. A hippokampusz működését legegyszerűbb patkányokban és egerekben vizsgálni. Mivel ők hulladékevő állatok ezért életük nagy részét a táplálék felderítésével töltik, sokat mozognak viszonylag összetett környezetben. Ezekben az állatokban a leggyakoribb szituáció, hogy valahol elhelyezkednek a térben. Hippokampuszukban a szituációkat kódoló sejtjeik érzékelő mezejét térbeli-mezőknek, angolul „place field”-eknek, a reagáló sejteket hely-sejteknek nevezik. Amikor az állat például végigszalad egy kísérleti labirintuson, az egyes hely sejtek egymás után bekapcsolódnak. A helysejtek azonban nem összevissza, hanem pontos időzítésben kapcsolnak be, igazodva a mozgás alatt a hippokampuszban előforduló theta nevezetű EEG hullámokhoz. A theta hullámok alatt másodpercenként 7szer visszajátszódik, hogy éppen merre mozgott az állat, sőt egy kicsit olyan helysejtek is aktiválódnak, ahol még nem járt az állat, de a jelenlegi pont közelében található helyet jeleznek. A kutatók feltételezik, hogy a theta hullámok alatt az állat a memóriájából előhívja azt, hogy az aktuális helyszínhez (élményhez) milyen dolgok társulnak (jó, rossz), illetve kicsit előre is gondolkodik, hogy mi lehet a közelben, merre érdemes menni. A hippokampuszban egy pillanatban egyszerre működő sejtek mintázata egy külső megfigyelő számára kb. olyan érthetően kódolja a külvilágot, mint a Mátrixban a képernyőn lefelé sodródó zöld hieroglifák a Mátrixban zajló történéseket. Nekünk idegen, de a patkány agyának élményszerűen írja le a történéseket, mint ahogy az áruló operátor Cypher számára is képpé alakultak a hieroglifák.





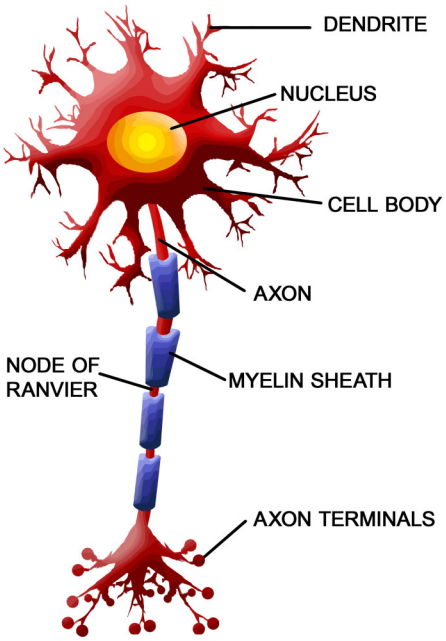
Amikor érzék-mezőkről és helysejtekről beszélünk fontos kiemelni, hogy egy-egy kép, térbeli hely vagy egy élmény érzékelésekor sohasem egyetlen idegsejt aktiválódik, hanem sejtek nagyobb csoportjai. A feldolgozás során ezek a sejtcsoportok más sejtcsoportokat aktiválnak és ha már megfigyeltük egy ideig a sejtek viselkedését, az aktív sejtek



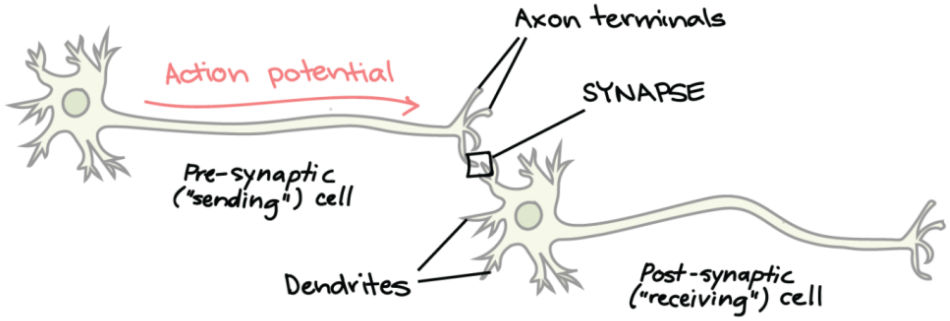
mintázatából vissza lehet fejteni, hogy mit lát az állat vagy merre jár. A kódolás megfejtésének még igencsak az elején járunk. Azt például nem tudjuk, hogy amikor agyunk megpróbálja kitalálni mi történhet hamarosan (jóslatot tesz, a dolog statisztikai értelmében) milyen módon kódolja azt, hogy a jóslatot mennyire tartja megbízhatónak. Nos ezt a kérdést vizsgálja a nemrég megjelent cikk. A szerzők azt nézték meg, hogy a megfigyelt sejtaktivitás mintázatok melyik lehetséges kódolási formának felelnek meg. Eredményeik ötleteket adhatnak, hogy a mesterséges intelligencia kutatói milyen megoldásokhoz folyamodjanak, amikor változó környezetben kell dönteni.

A legalapabb alapok: A jeláramlás lépései az idegsejtekben

Itt az ideje, hogy visszatérjünk a sok technika után az agyműködésről szóló #agyséta szálra. A leges-legalapabb idegtudományi tudnivalókat foglalom ma össze: Hogyan összegzik az idegrendszer alap építőkövei az idegsejtek a rájuk érkező jeleket és hogyan válaszolnak rájuk?

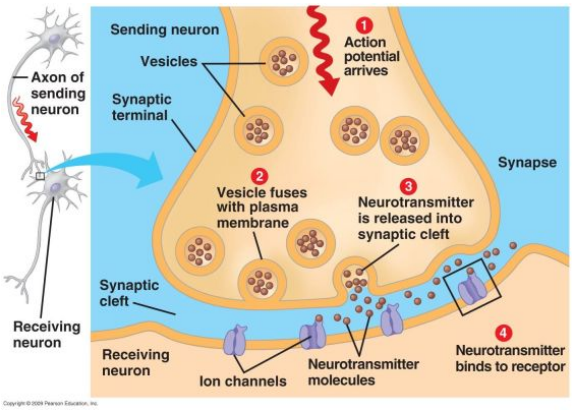


Az idegrendszer fejlődésénél láttuk, hogy a hámsejtekből kialakult idegsejtek hosszú nyúlványokat növesztettek és a sejtek két jelátvivő rendszerét is átvették (elektromos és kémiai), majd továbbfejlesztették. Az idegsejtek 20 µm méretű sejttestében található a genetikai információt hordozó sejtmag és az azt körülvevő sejtplazmában készülnek a sejtet alkotó molekulák. A sejttestről két-féle nyúlvány ered. A 4-6 viszonylag vastag (2-3 µm), 300-600 µm távolságra futó, többször elágazó dendritágra érkeznek más idegsejtektől a jelek. Ezzel szemben egy idegsejtről egyetlen axon indul, mely vékony (0.5 µm), igen hosszú (össz-hossza akár 1 méter is lehet) és nagyon gazdagon elágazik. Az axonágakon apró gombócok, axonvégződések (axonterminálisok, boutonok) ülnek, amelyek ingerületátvivő kapcsolatokat, szinapszisokat alkotnak más idegsejtek denritjeivel. Az axonok ezeken keresztül adják át az információt. Az idegsejteken tehát elkülönül a jel begyűjtésének helye (dendritek) a jel összegzésének (sejttest) és a jel leadásának (axonvégződések) helyétől. Az ingeráramlás iránya szinapszis -> dendrit -> sejttest -> axon ágak -> axonvégződés -> szinapszis.



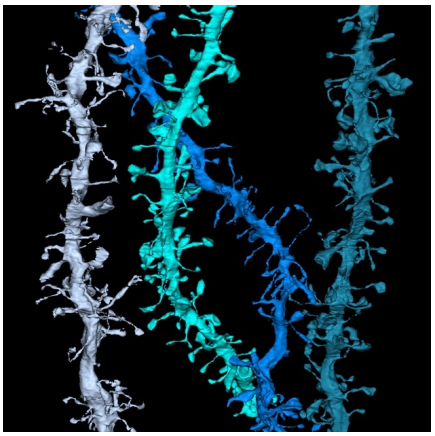
Synapse Site Of Impulse Propagation Between Cells - Nerve Cell - MCAT ...

A jel a hosszú nyúlványokon (axon és dendrit) gyorsan, elektromos áram formájában terjed, de amikor egy szinapszishoz ér, akkor ott az axonvégződés egy kémiai jelátvivő molekulát, transzmittert önt a szinapszis túloldalán található dendritre. A dendritben található érzékelő molekulák ezt a kémiai jelet újra elektromos jellé alakítják. Ennek a látszólag értelmetlen, kicsit lassú és bonyolult elektromos-kémiai-elektromos átkapcsolásnak -mint a biológiában sok mindennek- történelmi (evolúciós) okai vannak, de mint majd a későbbiekben látjuk egy igen kifinomult tanulásra képes idegrendszer megalapozásához elengedhetetlen.



No akkor újra ugyanez, egy kicsit részletesebben. Először is, mi az a szinapszis? Két idegsejt közötti kapcsolat. Egyik felét (pre-szinaptikus, szinapszis előtti oldal) az axonterminális alkotja, amelyben szinaptikus hólyagocskákba, 40 nm átmérőjű gömböcskékbe van becsomagolva az átvivőanyag (transzmitter). A szinapszis másik felét (poszt-szinaptikus, szinapszis utáni oldal) a dendrit egy része alkotja, amelynek szinapszishoz közeli részében az átvivő anyag érzékelésére alkalmas jelfogó fehérjék (receptorok) találhatók. A szinapszis két fele között található a szinaptikus rés, mely 20nm széles. Amikor az axonon eleketromos jel érkezik, a végződésben található hólyagocskákból felszabadul az ingerületátvivő anyag a szinaptikus résbe. Ezen igen gyorsan (1 msec) átdiffundál, majd hozzákötődik a túloldalon várakozó receptor molekulákhoz. Ezek közvetlenül vagy közvetve ionokat engednek át a sejthártyán, ezzel elektromos jeleket állítanak elő, melyek végigterjednek a dendriteken. Az ingerületátvivő anyag az axonokat adó sejt (preszinaptikus sejt) típusától függően más és más. Az agykéregben ez leggyakrabban egy glutamát vagy egy GABA nevezetű aminosav lehet. A glutamát egy serkentő transzmitter, mivel olyan áramokat vált ki a célsejtben (posztszinaptikus sejt) amelyek hatására a célsejt aktivitás nő. A GABA a gátlósejtek transzmittere, mivel az általa kiváltott áramok csökkentik a sejtek aktivitását.

Nomármost, egy átlag agykérgi idegsejt dendritfájára, melynek teljes hossza milliméterekben mérhető, átlagosan 20.000 szinapszist kap, melyeknek 85% serkentő, a maradék pedig gátló. Egy adott pillanatban több száz szinapszis aktiválódik egy sejt dendritfájának felszínén. Az egyes szinapszisokba beömlő áramok meglehetősen bonyolult szabályok alapján összegződnek és eljutnak a sejttesthez. A serkentő áramok és a gátló



áramok kivonódnak egymásból, mivel ellenkező előjelűek. Ha a serkentés erősebb, mint a gátlás és a sejttesten kialakuló feszültség elér egy küszöbértéket, akkor a sejt egy gyors és erős elektromos impulzust, akciós potenciált küld végig az axonján. Ez hatékonyan és gyorsan (2-3 msec) eljut az axonvégződésekig és azokból (akár mind a 20.000) felszabadítja a sejtre jellemző ingerületátvivő anyagot. És kezdődik a dolog elölről... Két egymás után kapcsolt idegsejt között az ingerületátvitel ideje 3-6msec. Azaz 1 másodperc alatt 1000/5 = 200 idegsejten ugrálhat végig a válasz.

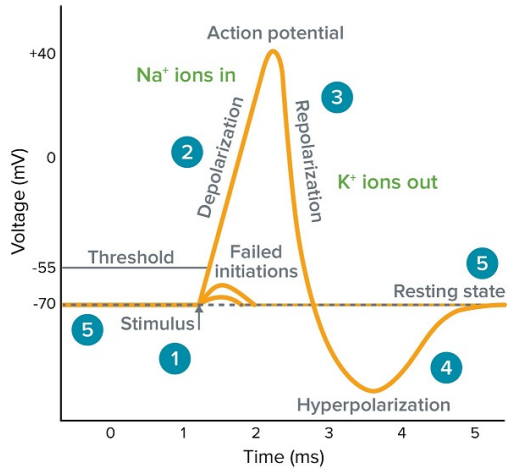
A folyamat tehát: jel felfogása, jel összegzése, jel leadása. A hidra példáján már láttuk, hogy már egy egytagú idegrendszer is mekkora előny, amikor reagálni kell a környezet kihívásaira. De, mint a sétán majd kibontakozik, a legfontosabb lépés a jel összegzése. Ez teszi majd az idegsejteket képessé arra, hogy tanuljanak, döntsenek, kódoljanak. Azáltal, hogy egy idegsejt 20.000 másiktól kap jeleket a felszínén folyó áramok bonyolult kölcsönhatásokba lépnek és bonyolult számítási műveleteket képesek végrehajtani. Legyen mára ennyi elég, a következő #agyséta alkalommal elmélyedünk abban hogyan alakul ki az idegsejtek sejthártyáján a feszültségkülönbség, a szinaptikus áram és hogyan történik a jelek összegzése.

Tengerből jöttünk és tengervízből vagyunk: a membránfeszültség kialakulása az idegsejtekben.

Kicsit el kell merüljünk abban is, hogy pontosan mik az ionáramok és a feszültségek, amelyek a sejthártyán folynak és kialakulnak, majd összegződnek. Tengerből jöttünk (az ősóceánban alakultak ki az első sejtek) és tengervízből vagyunk. Testünk sejtjeiben a Nátrium- Na^+, Kálium- K^+, Kalcium- Ca^{2+} és Klorid- Cl^- ionok hasonló sűrűségben (koncentráció) találhatók meg, mint az ősóceánban, hiszen az első óriásmolekulák (makromolekulák) a fehérjék és a nukleinsavak ott alakultak ki és megfelelő működésükhöz ezekre az ionokra van szükségük megfelelő koncentrációban.

Szerintem az egész #agyséta során ez a legnehezebben megérthető rész, a többi könnyebb lesz, ígérem! A dolgot el lehet mesélni egyszerűen, de akkor nem megérteni, hanem legfeljebb megtanulni lehet mi, hogy van. Ezért elmesélem hosszabban is, az alapoktól.

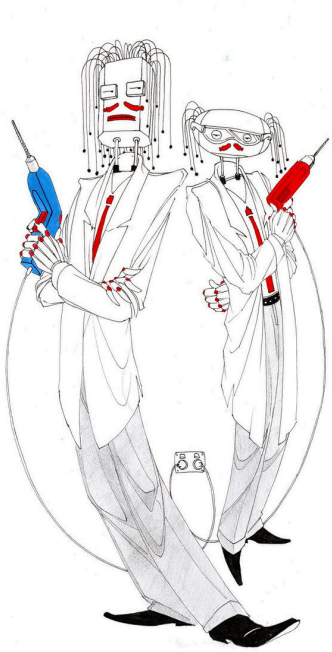
Egyszerűen mesélve:
Az idegsejt hártyájának belső és külső felszíne között, az ion koncentráció különbségek miatt feszültség különbség alakul ki. Ha egy sejtet békén hagynak a belseje 60 mV-al (a milliVolt a Volt ezredrésze) negatívabb a felszínénél, ezt a -60mVos feszültségszintet hívjuk a sejt **nyugalmi potenciál**jának (5). Ha egy serkentő szinapszisban a felszabaduló átvivő anyag, a glutamát, aktiválja a dendriten elhelyezkedő megfelelő glutamát receptorokat, akkor azokon áram folyik be, és a sejt potenciálja elmozdul a 0 felé, azaz a -60mVos feszültség csökken, mondjuk -50mV-ra (1). Ha egy gátló bementből a gátló ingerületátvivő anyag, a GABA szabadul fel, akkor ez a GABA receptorait nyitja ki, melynek hatására ellentétes irányú áram folyik a dendriten és a membránpotenciál negatív irányba, -75mV felé, tolódik el. Ha egyszerre folynak serkentő és gátló **áramok** azok **előjelesen összeadódnak (kioltják egymást)** és ezután terjednek a sejttest felé. Ha a sejt testén a potenciál kellően messze

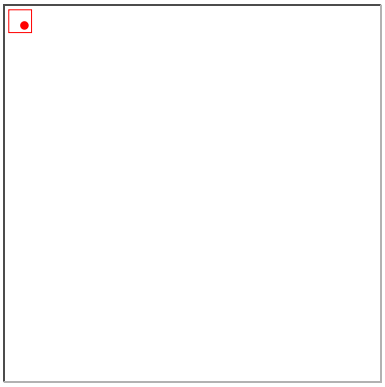


elmozdul a 0 felé (2), mondjuk -35mV-ra, a sejt egy gyors és nagy, +20mV-ig ugró **akciós potenciál**t állít elő (2-3), mely végigszalad az axonon. Tehát, ha a sejtre kellően sok serkentés érkezik, melyet nem ellensúlyoz gátlás, a sejt aktiválódik, kisül, és jelet küld ki. Mint később látni fogjuk, a haladó szinten az idegsejtek dendritjein a jelterjedést sok, a dendritekben elhelyezkedő ioncsatorna befolyásolja, ezzel a sejtek erősítik, pontosítják, szűrik, összegzik a rájuk érkező jeleket.

No és innen csak a bátrak kövessenek…

Alaposan, keményen:
Először azt vizsgáljuk meg hogyan alakul ki feszültségkülönbség az idegsejtek felszínén. Stanislaw Lem Kiberidájának hősei Trurl és Klapanciusz robotok voltak, áramkörökkel. A regényben megjelenő „sápatagok”, az emberek, puha, nedves lények voltak, szemükből víz jött, szájukból dohos levegő. Míg az elektromos szerkezetek nem szeretik a vizet és a huzalokban elektronok vezetik az áramokat, az élőlények sejtjeiben és a sejtek közötti térben vízben oldott, elektromos töltéssel rendelkező atomok és molekulák, úgynevezett **ionok vezetik az áramot**. Mivel az elektromos kölcsönhatás igen erős, ezért általában az egymást vonzó pozitív és negatív töltések (vizes közegben ionok) egyenlő arányban fordulnak elő, nincs töltés-szétválás. Ahhoz pedig, hogy valahol feszültségkülönbség alakuljon ki a két töltésnek el kell különülnie egymástól. Hogy ennek a mechanizmusát megértsük el kell merüljünk a biológus hallgatók rettegett tantárgyában a fizikai kémiában.



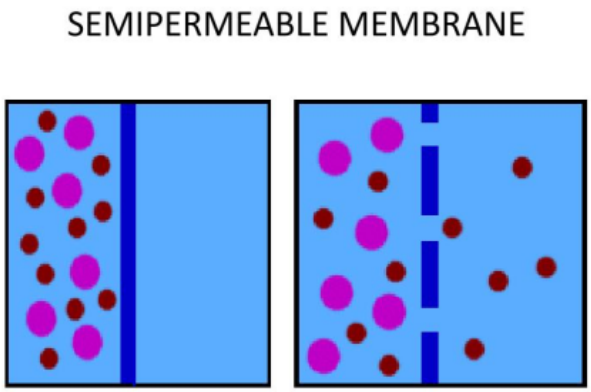


3_PLANT_AND_WATER_RELATIONSHIP

A molekulák mozgását nem csak elektromos töltésük és a rájuk ható elektromos erőtér (vonzás-taszítás), hanem a koncentrációjuk is befolyásolja. Ha egy tömény oldat, pl. sós tengervíz vagy hihetetlenül cukros üdítő találkozik egy hígabb oldattal (sima víz) akkor a töményebb (nagyobb koncentrációjú) oldatból az oldott anyagok igyekeznek elmozdulni a hígabb oldat felé, az oldószer (jelen esetben a víz), pedig a töményebb oldal felé. Ez a mozgás mindaddig tart amíg a két részben az oldott anyagok mennyisége (töménysége, koncentrációja) ugyanakkora nem lesz, a koncentrációk kiegyenlítődnek. Ez a **koncentráció különbség** (gradiens) **irányába történő áramlás** alapelve. Mindennapi példával, amikor a szupermarketben kinyitnak egy új pénztárt akkor az emberek egy része odaszalad (időnként túl sok is). Rövid felfordulás után minden sorban ugyanannyi ember fog állni. De ugyanez

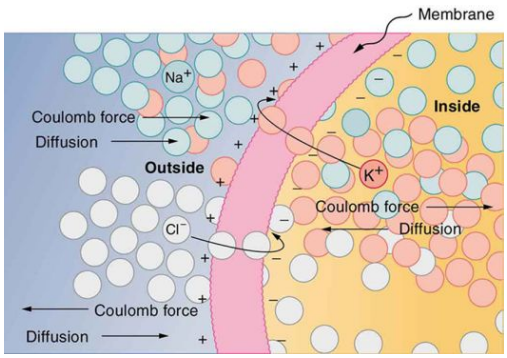


van egy kocsmában is, ha felszabadul egy asztal. Mint a kocsmalátogatók, a molekulák is igyekeznek egyenletesen kitölteni a rendelkezésükre álló teret. Szervezetünk sejtjeiben elsősorban Na^+, K^+ és kisebb mértékben Ca^{2+} valamint Mg^{2+} ionok hordozzák a pozitív töltéseket. A negatív töltéseket praktikusan egyfajta ion, a kloridion (Cl^-) hordozza. Illetve a fehérjék jelentős része is negatív töltésű. Nem véletlen, hogy szervezetünknek hihetetlenül fontos a NaCl, a konyhasó, hiszen sejtünk oldatait nagyrészt ez alkotja. Az izotóniás sportitalok az izzadás során elvesztett sókat pótolják, ezek hiányában idegeink és izmaink rosszul működnek, amiről kellemetlen görcsök vagy a fejfájás formájában szerzünk tudomást.
Ionos (töltéssel rendelkező) oldatokban bonyolult a molekulák mozgása. Amikor egy töményebb sóoldat hígabbal találkozik, a molekulák elkezdenek rohanni az „üres asztalok" felé. Ámde a különböző ionok más sebességgel tudnak mozogni, mivel eltérő súlyúak és méretűek. A könnyebb és kisebb, gyorsabban mozog és gyorsabban diffundál. Viszont mivel elektromos töltéssel rendelkeznek, ezért hiába gyorsabbak mondjuk a pozitív ionok, nem tudnak előre szaladni, mert az elektromos vonzóerő hozzájuk köti a lomhább negatív ionokat. Azaz ilyen esetben, hiába hajtja az ionokat a koncentráció különbség, nem válnak el egymástól, mivel a lomhábbakat nem csak a koncentrációkülönbség hajtja előre, hanem az előre szaladt ellentétes töltésű ionok elektromos vonzása is.
De a helyzet lehet még ennél bonyolultabb, és a sejtekben lesz is. A sejthártya alapját szigetelő zsírokból álló hártya alkotja, melybe különböző szerkezetű és funkciójú fehérjék épülnek be. Szerepük, hogy a sejt a környezetéből felvehessen kisebb méretű tápanyag molekulákat, illetve leadhasson kisebb méretű salakanyag molekulákat vagy a működéséhez szükséges anyagokat válasszon ki környezetébe, de mindeközben megőrizze a számára fontos anyagokat és kizárja a nem kívántakat. A sejthártyán kicsi nyílásokat létrehozó fehérjék szerepe, hogy válogassanak abban mit engednek át és mit nem. A sejt számára fontos anyagokat: cukrokat, ionokat, működéséhez szükséges fehérjéket és vizet a sejthártya bent tartja a sejten belül. Az ilyen hártyát **félig áteresztő hártyá**nak nevezik és sok érdekes tulajdonsága van (lásd pl. ozmózis).

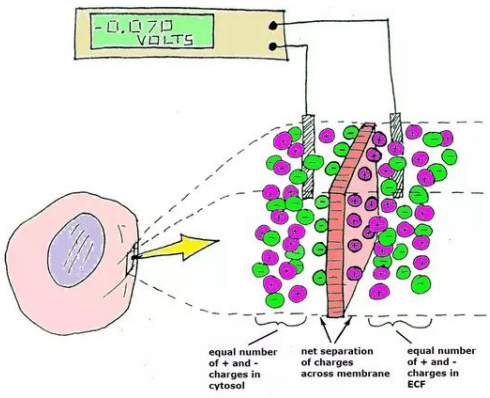


Alap esetben egy nyíláson az átengedett anyagok a koncentráció gradiensnek (különbségnek) megfelelően mozognak, rohannak az üres asztalokhoz. De léteznek olyan fehérjék is, amik energiát felhasználva képesek arra, hogy az alacsonyabb koncentrációjú helyről a magasabb koncentrációjú hely felé hajtsák a molekulákat, ionokat (mint amikor a koncerten a Rendezők elzavarják az üres VIP ülésekről az élelmesen odaszivárgott nézőket).
Olyan fehérjék is léteznek, amelyek a membrán két oldala között kicserélnek anyagokat. Ilyenkor az egyik anyagot hajtó koncentráció különbség hajtja a másik molekula mozgását.
Mindennek az lesz a következménye, hogy a sejthártya nem lesz egyformán átjárható a különböző anyagok számára. Bizonyos ionok és molekulák eltérő sebességgel, vagy egyáltalán nem tudnak átmenni a sejthártyán. Ennek következtében alakul ki feszültségkülönbség a sejthártya két oldala között. A Gibbs-Donnan hatás magyarázza meg mi is történik.
A bonyodalom abból származik, hogy minden résztvő anyagra **két erő hat:** a koncentráció

különbségből fakadó hajtóerő (diffúzió), illetve az elektromos erő (Coulomb erő). A sejtekben a pozitív töltést a fent felsorolt pozitív töltésű ionok hordozzák. A negatív töltés egy részét a Cl^- ionok, másik részét a sejtekben található fehérjék.



Hogy mi is történik világítsuk meg egy hasonlattal. Tegyük fel, hogy egy koncerten a VIP belépővel rendelkező párokon kívül azok a lányok is ingyen bemehetnek a kerítéssel elválaszott VIP területre, akiknek aznap születésnapja van. Amikor elkezdődik a koncert, akkor az érkező párok egyenletesen kitöltik a nézőteret, a fiúk és a lányok nem különülnek el. Egyre nagyobb lesz a tömeg. A VIP belépővel rendelkező párok gyorsan bemennek a VIP területre, mert ott nincs tömeg (hajtja őket a koncentráció különbség). De egy idő után a születésnapos lányok is bemennek oda, mert nagy a nyüzsgés. Viszont ők nem akarnak szívük választottjától (akit nem engedtek be, számukra nem átjárható a határ) messzire kerülni (elektromos vonzóerő), ezért ők a VIP terület kerítésének belső oldalán fognak állni, velük szemben, a kerítés külső oldalán pedig felhalmozódnak az őket kísérő fiúk. Ha megnézzük a koncerttermet mindenhol fiú lány párokat fogunk találni (A VIP területen belül is meg kívül is), kivéve a kerítés mentén, ahol belül a lányok, kívül a fiúk fognak felhalmozódni és kialakítanak egy fiú-lány **kettős réteg**et (a nemek feszültség különbségét).



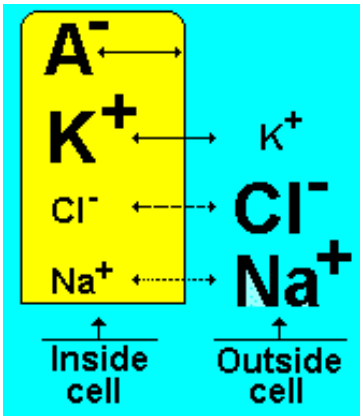
Hasonló történik az idegsejtek felszínén is. A sejt belsejében lévő fehérjék számára (melyek legtöbbje negatív töltéssel rendelkezik) nem átjárható a sejthártya. A negatív Cl^- ionok és pozitív fémionok (kationok) számára igen. Az elektromos vonzás és koncentráció különbségek hatására egy olyan egyensúly áll be, hogy egy kicsit több negatív töltés van a sejthártya belső felszínén és egy kicsit több pozitív töltés a külső felszínén. A sejtben rekedt negatív fehérjék töltését a külső felszínen halmozódó pozitív ionok ellensúlyozzák. A kettős töltésréteg eredményeképpen a sejthártya két felszíne között 60mV feszültség különbség alakul ki. A sejt belseje ennyivel negatívabb a felszínénél.
Hogy ebből hogyan lesz jelátvitel azt a következő alkalommal beszéljük meg.

Kérdés?

Merre húzzák K+ovácsék a kötelet:? A szinaptikus áramok és az akciós potenciálok kialakulása

Folytatjuk a durva részt. A membránpotenciál kialakulásánál vannak még bonyolultabb dolgok, ugyanis a sejthártyában található csatornák és pumpák képesek megváltoztatni egyrészt az egyes ionok esetében a sejthártya átjárhatóságát, másrészt a koncentráció különbség ellenébe is képesek ionokat szállítani (meg is teszik, hiszen a sejtek belsejében pontosan meghatározott ionkoncentrációkat kell beállítani a finnyás fehérjék miatt).

Szerencsére a fizikusok kitalálták hogyan lehet viszonylag egyszerűen számolni a membránpotenciált.



Ha tudjuk **egy ion belső és külső koncentrációit**, a Nernst egyenlet segítségével **kiszámolhatjuk az ezekhez a koncentrációkhoz tartozó egyensúlyi potenciált**. Azaz, hogy mekkora feszültségkülönbség kell ahhoz, hogy ez a koncentrációkülönbség fennáljon és fordítva, ekkora koncentráció különbség mekkora feszültség esetén áll be. Mivel a csatornák és pumpák pontosan beállítják az egyes ionok belső és külső koncentrációját (mint ahogy az ősóceánban volt), ezért az egyes ionoknak mind megvan a saját jellegzetes **egyensúlyi potenciál**ja. Ez a Na^+ esetében nagyon pozitív (+60mV), mivel kint sok a Na^+, míg a K^+ esetében nagyon negatív (-120mV), mivel bent sok a K^+. A harmadik meghatározó ion a Cl^- esetében pedig valahol a nyugalmi potenciál környékén, -70mV körül van.

Egy meglehetősen egyszerű összefüggés adja meg a sejthártyán beálló feszültségkülönbséget. Minél áteresztőbb a sejthártya egy ion számára, annál jobban „húzza" az adott ion a saját egyensúlyi potenciálja felé a membránpotenciált. Szemléletesebben. Képzeljünk el egy magas épületet, aminek a homlokzatán végig fut lentről felfelé egy kötél, ami egy árnyékoló ponyvát mozgat. Sajnos a vállalkozó ellopta a ponyva árát, ezért az csak akkora, hogy egyszerre csak egy emeletet lehet vele árnyékolni. A földszinten laknak K^+ovácsék (Ők jelképezik a K^+ -120mVos egyensúlyi potenciálját), valahol középtájt Cl^-aude-ék (Ők a Cl^- -60 mV os potenciálját) és az épület tetején pedig Na^+gyék laknak, a maguk +20mV-os egyensúlyi potenciáljával. Mindenki igyekszik maga felé húzni a ponyvát, mert igen süt a nap, nekifeszülnek mindannyian. K^+ovácsék és Na^+gyék húzzák majd megszakadnak, de a ponyva csak valahol kettejük közt félúton áll meg. Ez -120 - +20 = -140 / 2 azaz -70mV lenne, de ott vannak még Cl^-aude-ék is, akiknek már nagyon nem is kell húznia, hogy a ponyva megálljon a közelükben -60mVnál.



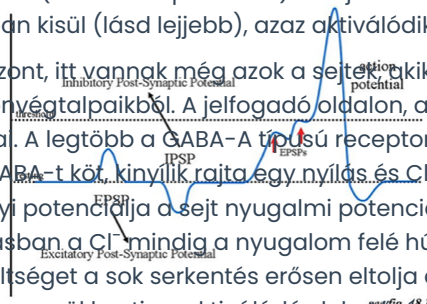
No de mi történik, amikor jel érkezik a sejtre?

Egy serkentő axonvégződésből a glutamát nevezetű aminosav szabadul fel. A másodperc 10ezred része alatt átússza a szinaptikus rés 30 nm-es távját, majd rövid időre (1-2msec) hozzákötődik a dendrit sejthártyájában ücsörgő valamelyik glutamát receptor típushoz. Ezek leggyakoribb típusa az AMPA receptor, egyben egy Na^+ és Ca^{2+} ionokat áteresztő képes ioncsatorna is. Amikor az átvivő anyag kötésének hatására kinyílik, a sejtbe (mivel ott kevés van) bezúdulnak a pozitív töltésű Na^+ ionok (és valamennyi Ca^{2+} is) és a sejt membránpotenciálja a pozitív irányba mozdul el egy időre. Ezt hívják serkentő szinaptikus potenciálnak (angolul: excitatory postsynaptic potential, a rövidítésével: **EPSP** még sokat fogunk találkozni).

A fenti huzakodós példában az történne, hogy Na^+gyékhoz villámlátogatásra érkezik a nagynénjük és ő is beszáll a kötélhúzásba egy időre. Ezt a ház előtt sétálgató abból látja, hogy ez időre a ponyva kicsit feljebb emelkedik, majd visszatér az eredeti állapotába.

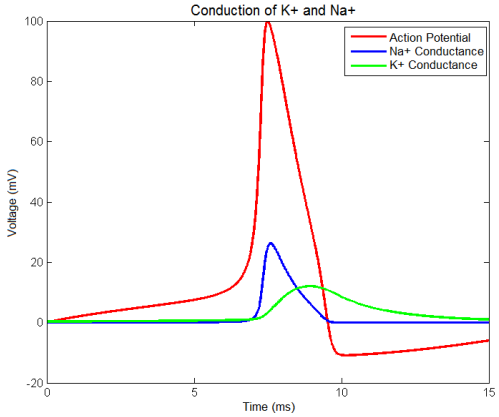
Ha több szinapszison egyszerre több serkentés érkezik a kiváltott áramok összeadódnak és a sejt erősebben depolarizálódik (mozdul el a pozitív irányba). Ha a

serkentődés (membrán potenciál) szintje eléri a küszöbértéket a sejt akciós potenciál formájában kisül (lásd lejjebb), azaz aktiválódik, jelet bocsájt ki magából.



Viszont, itt vannak még azok a sejtek, akik GABA-t, gátló átvivő anyagot szabadítanak fel az axonvégtalpaikból. A jelfogadó oldalon, a célsejt denritjén itt a GABAnak találhatók receptorai. A legtöbb a GABA-A típusú receptorából van. Ez egyben egy Cl^- csatorna is. Amikor GABA-t kötődik, kinyílik rajta egy nyílás és Cl^- ionokat ereszt át magán. Mivel a Cl^- egyensúlyi potenciálja a sejt nyugalmi potenciálja környékén van (-65mV) ezért a kötélhúzásban a Cl^- mindig a nyugalom felé húzza a sejtet. Azaz, ha egy sejt membránján eső feszültséget a sok serkentés erősen eltolja az aktiválódás irányába, akkor a Cl^- visszahúzza, csökkenti az aktiválódás lehetőségét, azaz gátolja a sejt aktivitását. Ezt hívják szinaptikus gátló potenciálnak (angolul inhibitory postsynaptic potential, rövidítve **IPSP**, amivel szintén sokat fogunk találkozni). A GABA-A receptoron keresztül könnyen áramlanak át az ionok (magas a vezetőképessége, konduktanciája). Ez a kötélcibálós modellben úgy néz ki, hogy hiába jönnek Na^+gyékhoz sokan és cibálják felfelé a ponyvát, Cl^-audék családja igen kiterjedt, mindig sokan érkeznek és hatékonyan vissza tudják rángatni a ponyvát maguk felé.

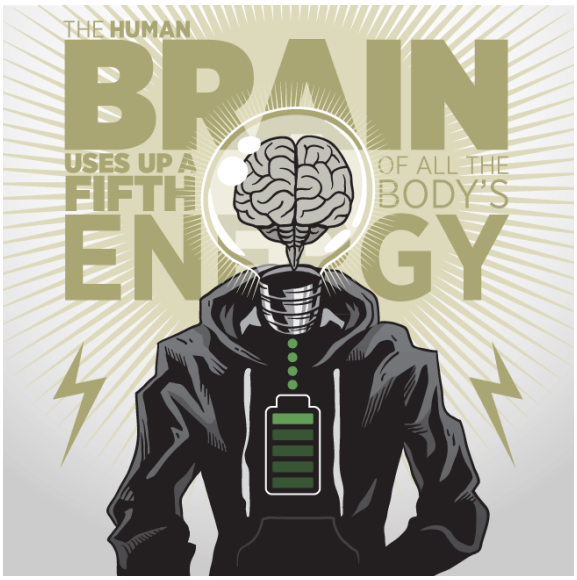
Egy sejtre ugye több 10ezer szinapszis érkezik. Egy adott pillanatban, ebből több száz lehet aktív. Azt hogy a sejt jelet bocsájt-e ki vagy nem, az dönti el, hogy a serkentő és a gátló áramok eredője elmozdítja-e a membránpotenciált a tüzelési küszöbig (hányan és merre rángatják a ponyvát).



Amikor a membránpotenciál értéke (a serkentés hatására beáramló Na^+ és Ca^{2+} ionok hatására) kellően pozitívvá válik (**tüzelési küszöb** ~40mV) akkor feszültségre érzékeny Na-csatornák nyílnak meg (*kék görbe*) és a Na^+ ionok elkezdenek egyensúlyi potenciáljuk (+60mV) irányába áramlani, azaz beáramlanak a sejtbe, pozitívvá teszik azt. Az **akciós potenciál** (*piros görbe*) csúcsán a membránpotenciál értéke nagyon közel van a Na^+ ionok egyensúlyi potenciáljához mivel nagyon sok csatorna nyílt ki (Na^+gyékhoz az egész rokonság megérkezett és mindenki húzza a kötelet). Az akciós potenciál azért nagyon rövid, mert amikor a membrán potenciál pozitív irányba mozdul el, kinyílnak a feszültség érzékeny K^+ csatornák (*zöld görbe*) is és a sejtből kiáramló K^+ ionok (egyensúlyi potenciáljuk -120mV) csökkentik a sejt belsejében a pozitív töltést (a nagy bulit látva K^+ovácsékhoz is megérkezik a rengeteg rokon, hogy visszacibálják a ponyvát). A membránpotenciál visszatér a nyugalmi szintre (-60mV). Persze a beáramlott Na^+ és kiáramlott K^+ ionokat az ioncserélő pumpák elkezdik visszapumpálni. Mivel itt a koncentráció különbség ellen kell dolgozni ezek a pumpák a sejtek valutáját az adenozin-trifoszfátot (ATP-t) használják fel. Igen sokat. A membránpotenciál fenntartása igen energiaigényes.

Egy ember nyugalmi állapotban 100W energiát használ, ennek 20%-át agyunk fogyasztja. Azt, hogy ekkora agyat növeszthettünk (és ezáltal hatékonyabban tudjunk túlélni), az emberré válás során számos evolúciós fejlesztésnek kellett megelőznie. Kialakult mindenevő fogazatunk, mely a táplálékot, majdnem bármilyen táplálékot, képes hatékonyan megrágni, hogy energiatartalmát emésztéssel kinyerhessük. A rengeteg hőt termelő agyunkat hűteni kell. Ez egyik oka annak, hogy szőrzetünket elvesztettük, így egész testfelszínünkön képesek vagyunk izzadni (nagyon kevés emlős képes erre) és a két lábra állás egyik hajtóereje is az volt, hogy ezáltal a trópusokon kisebb felszínen sütötte testünket

a nap. Hajunk azért maradt meg, hogy védje a napfény ellen fejünket.



No ezzel végére is értünk a legkeményebb két bejegyzésnek. Mindenkinek gratulálunk aki idáig túlélt! Egy könyedebb témával a szinapszisokkal folytatjuk legközelebb.

Mindenkinek Békés Ünnepeket kívánunk!



Kvadrillió mikroerősítő az agyban: a szinapszis

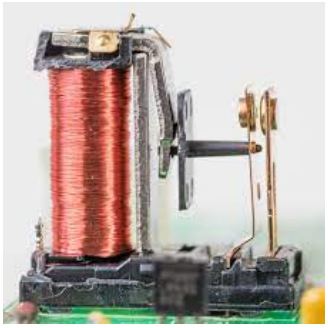
rovat: #agyséta

Az idegsejtek közötti jelátadási procedúra az eddigiek alapján feleslegesen bonyolultnak tűnhet. Joggal kérdezhetné meg az Olvasó, hogy minek ez az egész elektromos jelből kémiai, majd vissza jelátadás? Miért is nem elektromosan kommunikálnak az idegsejtek?

A helyzet az, hogy az idegrendszerben sok helyen található elektromos kommunikáció. A szemben, a kisagyban, a minap emlegetett talamuszban és még néhány helyen a sejtek

között réskapcsolatok találhatók (angolul: gap junction) amelyeken keresztül közvetlenül folyik az áram a sejtek között.

.



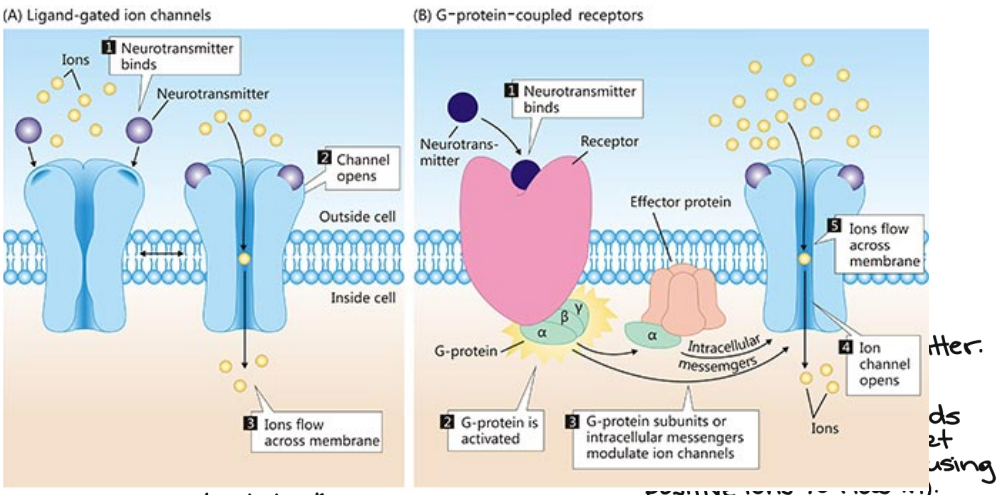
Azonban ezek a hatások igen gyengék, mivel ahogy az egyik sejten keletkezett áram beáramlik a sok sejtbe, erőssége csökken, felhígul. A sejtek ugyanazzal a problémával szembesülnek, mint amivel a drótos és drót nélküli távírás hőskorában a mérnökök szembesültek: a jel erőssége a terjedés során jelentősen csökken és egy idő után beleolvad a zajba. Ahhoz, hogy nagy távolságra tudjunk jeleket továbbítani, időnként jelerősítőket kell beépíteni. Igaz ez az elektromos kábelre, rádióhullámokra, de még az üvegszálban futó optikai jelekre is. A Hőskorban az elektromos jeleket relékkel erősítették. A bejövő gyenge áram bekapcsolt egy elektromágnes vezérelt kapcsolót, mely egy akkumulátorról újra erős áramot küldött a tovább futó kábelbe. A relé szó az angol „relay" szóból származik, melynek jelentése továbbadni. A technika fejlődésével aztán a reléket elektroncsövek majd tranzisztorok váltották fel. Az optikai kábelben pedig furcsa tulajdonságú kristályok működnek erősítőkként.

A szinapszis egy ilyen jelerősítő. Az axonvégtalpba érkező gyenge áram felszabadítja az átvivő anyagot, ami a túloldalon kinyit egy ioncsatornát (a relé elektronmágnese) amin nagy mennyiségű ion áramlik keresztül (bekapcsolt kapcsoló a relében) és kialakul egy felerősített jel. Egy emberi agyban 10^{11} idegsejt van, sejtenként 15.000 szinapszissal, azaz kb 10^{15} azaz kvadrillió erősítő! A jelenlegi csúcsprocesszorokban $5x10^{10}$ tranzisztor, azaz 5000x kevesebb erősítő van. Mindemellett az agy csak 30W teljesítményt használ 😊.

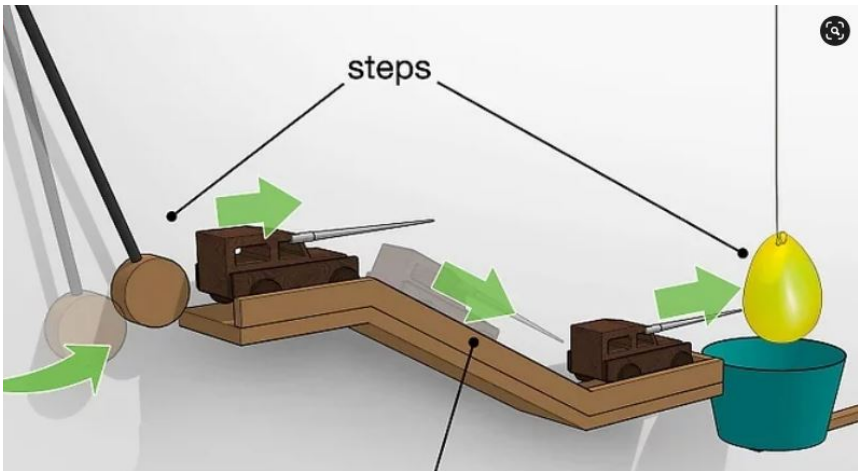
A szinapszisnak még más szerepe is van. Nagyon fontos a jelek modulációjában, hangolásában. A későbbiekben finomítani és bonyolítani fogjuk majd az idegsejtek működésének alapelveit. Itt majd látni lehet, hogy az agy eltérő helyzetekben máshogy dolgozza fel az információt, működésmódja modulált, hangolt. A jelfeldolgozás modulációjának egyik helye a szinapszis. A szinapszisnak mindkét oldalán az eddig tárgyaltakon kívül még sok egyéb receptor és csatorna molekula található, melyek befolyásolják, hogy az AP hatására milyen erős áram keletkezik a túloldalon.

Hogy megértsük hogyan állítható a szinapszis erősítője, vegyük át részletesebben mi is történik a jelátvitel során.

Ugye az axonon végigfut az akciós potenciál (AP, hogy hogyan a következő bejegyzésben olvashattok róla). Amikor eléri az axonvégtalpat (bouton, axonterminális) pozitív töltés halmozódik fel a sejthártya belső felszínén és a membránpotenciál a külső térhez képest +10 mV-ra változik. Az axonvégtalp sejthártyájában olyan fehérjék ülnek, melyek Ca^{2+} ionokat eresztenek a sejtbe, ha a membrán potenciál értéke pozitív lesz. Az AP érkezésekor tehát a feszültség érzékeny kalcium csatornákon keresztül Ca^{2+}+ ionok áramlanak a végtalpba. A végtalpban az átvivő anyagok jónéhány tucat 40nm (a nm a milliméter egymilliomod része) átmérőjű hólyagocskába, vezikulába vannak betöltve. A vezikulák felszínén olyan fehérjék találhatók melyek ha Ca^{2+} ionokat kötnek, a vezikulát hozzákapcsolják az axonvégtalp szinapszis felé néző sejthártyájában található fehérjékhez és az átvivő anyag a szinaptikus résbe ömlik.



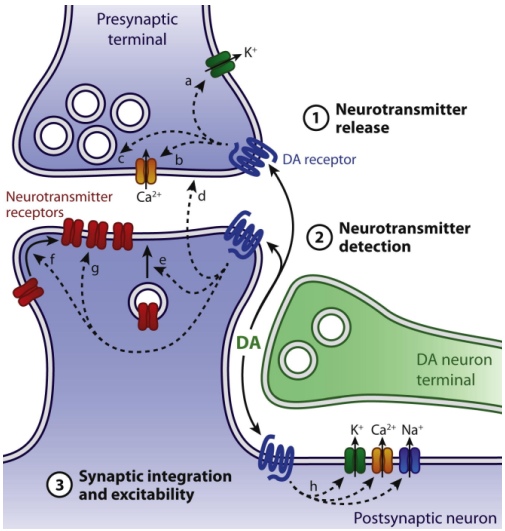
A szinapszis túloldalán, a fogadó sejt dendritjén olyan fehérjék találhatók (receptorok) melyek, ha találkoznak a nekik megfelelő ingerületátvivő anyaggal, akkor megváltoztatják alakjukat és, vagy ionokat és ezáltal elektromos áramot engednek át magukon, vagy a sejten belül kapcsolnak be olyan más fehérjéket amelyek ionokat és így áramokat engednek a sejtbe. A serkentő ingerületátvivő anyag, a glutamát receptorai vagy direkt engednek be Na^+-ot és kisebb mértékben (esetleg egyáltalán nem) Ca^{2+}-ot (ezek az AMPA és NMDA típusú receptorok), mellyel pozitívabbá teszik a sejt belsejét vagy indirekt hatásúak, azáltal, hogy másodlagos hírvivőket szabadítanak fel a sejt belsejében, melyek aztán a sejtek működését befolyásoló fehérjéket kapcsolnak be (metabotróp receptorok). A gátló transzmitter GABA (gamma-amino vajsav) is kétféle receptoron hathat. A GABAa receptor egymaga egy ion csatorna, mely GABA kötésére Cl^- ionokat enged a sejtbe és ezáltal annak hártyáját negatívabbá teszi. A GABAb receptora egy metabotróp receptor, azaz közvetve nem vezet áramot, de másodlagos hírvivő útján K^+ csatornákat nyit meg, és a koncentráció különbségnek megfelelően a sejtből kiáramló pozitív K^+ ionok távozása után a sejt belseje szintén negatívabb lesz.



OK. Tehát: akciós potenciál -> Ca^{2+} beáramlás az axonvégtalba -> a jelátvivő anyagot tartalmazó hólyagok Ca^{2+}-t kötnek és -> a jelátvivő anyag a szinaptikus résbe ömlik -> hozzáköt a megfelelő receptorokhoz -> a sejtbe vagy sejtből közvetlenül vagy közvetve ionok áramlanak -> az áram hatására serkentő esetben a sejt hártyája pozitívabbá, gátlás esetén negatívabbá válik. Ha jól látom itt 6 áttétel 6 "->" található. Ez feleslegesen

babrásnak tűnik, de ugyanakkor 6 helyen lehet a folyamatot befolyásolni és még így is csak 2-3 msec (msec a másodperc ezred része) kell az egészhez. Egy igazi Rube-Goldberg masina, csak gyorsabban és hasznosabbat csinál.

A szinaptikus jelátvitelt sokféle módon és ponton lehet hangolni. A mechanizmusok egy része preszinaptikus, a szinapszis előtt az axonvégtalpban történik, másik részük posztszinaptikus, azaz a szinapszis után, a dendritben történik. A preszinaptikus oldalon csavarni lehet azon, hogy mennyi Ca^{2+} áramoljon be az AP hatására, illetve azt, hogy a beáramlott Ca^{2+} milyen hatékonyan váltsa ki a transzmitter kiürülését. A cannabis hatóanyagai például ezen a ponton befolyásolják az agyműködést, azáltal, hogy serkentő és gátló axonok jelátviteli hatékonyságát csökkentik. A másik oldalon azon lehet csavargatni, hogy egy receptor mennyi iont engedjen be közvetve vagy közvetlenül, illetve, hogy hány receptor üljön a dendrit membránjában.

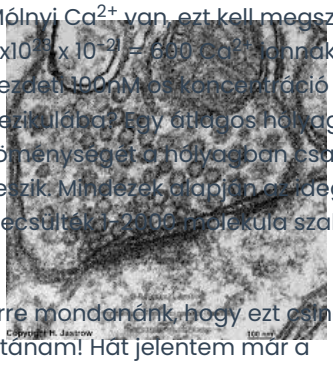


Ezen a helyen hat a dopamin, a jutalomhormon, ha jól cselekedtünk akkor felerősíti a szinaptikus áramokat, amiket a jelátvivő anyag felszabadulása kivált. Ha nagy mennyiségben szabadul fel ingerületátvivő anyag az AP hatására, valamint a túloldalon sok receptor ioncsatorna várja, amik alaposan kinyílnak, sok áram fog a sejtbe folyni és erős lesz a jel. Ha csak kevés ingerületátvivő anyag szabadul fel és kevés csatorna nyílhat, akkor a jelerősítés gyenge lesz. Azt már csak megsúgom, hogy a teljes zűrzavar, vagy inkább összetett moduláció érdekében az egyik szinapszisból felszabaduló ingerületátvivő anyag eljuthat egy másik szinapszisba és annak hatását befolyásolhatja. De ezen a mellékúton most nem megyünk tovább.

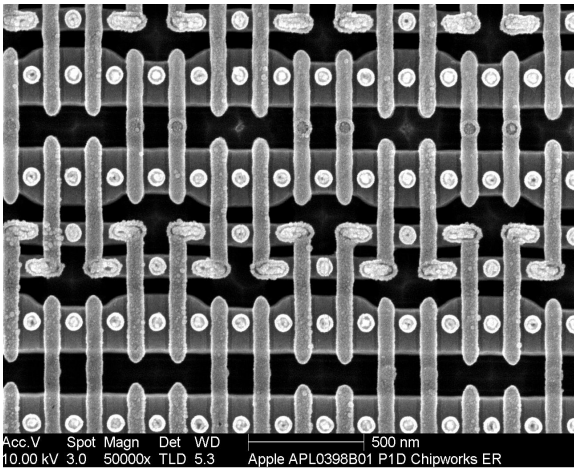
A szinaptikus jelátvitel modulációjának egyik legfontosabb szerepe a szinapszis erősségének változása tanulás során. Mint majd a későbbiekben bemutatjuk, a memória, tudásunk a sejtek közötti kapcsolatok erősségében, a szinapszisok hatékonyságában, tárolódik. Mindent, amit tanultunk, agyunk 1015 erősítőjének egyedi hangerő gombjának a beállításában tárolódik.

Végezetül egy kis színes kitérő, hogy legyen fogalmunk egy apró szinapszis méreteiről. Mi fér bele? A nyugalmi esetben 50-100nM a sejten belüli Ca^{2+} koncentráció, aktiválódáskor néhány 10 µM-ra (százszorosára) megy fel a Ca^{2+} koncentrációja azáltal, hogy a sejten kívüli tér 1mM-os (tízezerszerese mint bent) koncentrációban található Ca^{2+} ionjai közül jónéhány beáramlik a sejtbe. No de mennyi is ez a jónéhány? Egy nagyobbacska axonterminális térfogata megfelel egy 1x1x1 um-es kocka térfogatának. Ez 10^{-15} liternek felel meg. Ekkora térfogatban, ha a koncentráció 10 uMól (10-6 Mól), akkor $10^{-15} \times 10^{-6} = 10^{-21}$

Mólnyi Ca^{2+} van, ezt kell megszorozni az Avogadro számmal, azaz a kapott érték megfelel $6x10^{-3} x 10^{-24} = 6000 Ca^{2+}$ ionnak. Ennyi áramlik be tehát az axonvégtalp aktiválódásakor (a kezdeti 100nM-os koncentráció elhanyagolható). És hány átvivő anyag molekula fér be egy vezikulába? Egy átlagos hólyagocska átmérője 40nm, ez kb. 10-20 liter. A transzmitter töménységét a hólyagban csak becsülni lehet, mérni nem, olyan Mólos koncentrációjúra teszik. Mindezek alapján az ideg-izom átvitelben használt acetil-kolin esetében azt becsülték, 2000 molekula szabadulhat fel egy hólyagocskából.



Erre mondanánk, hogy ezt csinálják utánam! Hát jelentem már a természet után csinálták a mérnökök. Amikor egy SSD memória NAND kapujában egy bit tárolódik akkor néhány tucattól néhány száz atom mozdul el! Igaz a nagy számítógépek és tárolórendszerek energiafelhasználásban még nagyon távol állunk az agyétól.



Transistros in a single computer memory cell

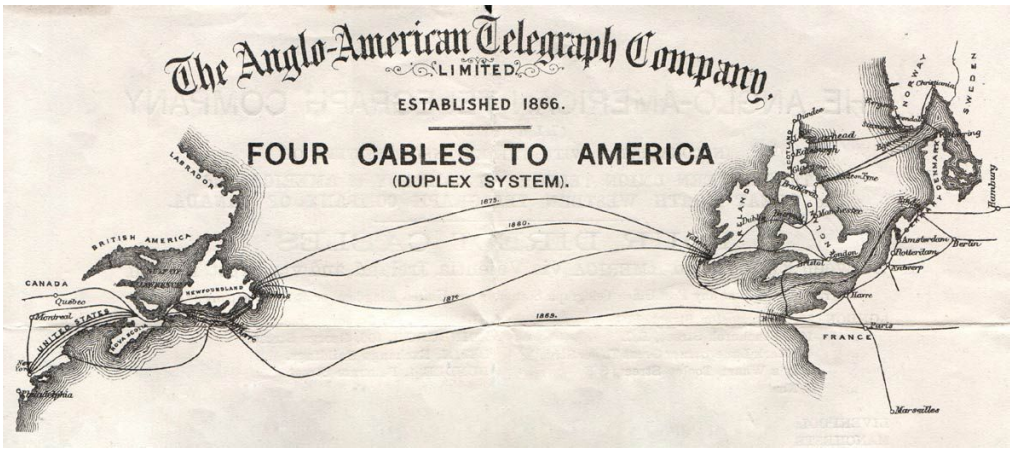
Az agysétát az órarugó gerincű ugráló akciós potenciálról szóló mesével folytatjuk majd.

Jelterjedés és jelösszegződés az idegsejtekben

Ha az idegsejtek csak jeleket továbbítanának, mint egy hálózati kábel, nem sok érdekeset csinálnának, a túlélést nemigen segítenék elő, mint ahogy a hálózati kábelen küldött zokni megrendelés sem válik útközben szerelmesverssé. Az idegsejtek funkciójuk szempontjából legfontosabb tulajdonsága, hogy összegzik a rájuk érkező jeleket és ezáltal egyszerű számítási feladatok elvégzésére képesek.

SZOLGÁLATI KÖZLEMÉNY: Hiányoztak idáig az ábraaláírások. Dolgozunk a problémán. Mostantól, ha az egeret az ábra fölé viszitek, akkor egy felugró mezőben megjelenik az ábraszöveg.

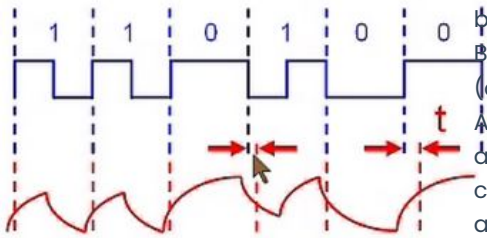
Egy átlagos idegsejt kiterjedt denritfájára 10-20 ezer szinapszis érkezik, ezek jelentős része serkentő, kisebb része megfelelően elhelyezett gátló. Ahhoz, hogy a serkentő és gátló áramok összegződését megértsük, először tisztában kell lenni azzal, hogyan terjednek az elektromos jelek az idegsejtek nyúlványain. Amikor a biológusok ezt megpróbálták leírni, hamar rájöttek, hogy a probléma fizikai leírását már egy évszázaddal korábban kidolgozták azok a mérnökök, akik a tenger alatti távírókábeleken terjedő jelek viselkedését próbálták megérteni a XIX század közepén.





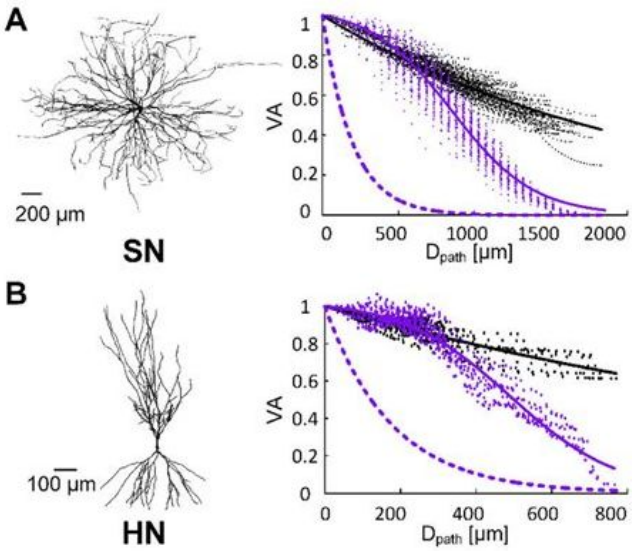
Amikor az első hosszabb tenger alatti távírókábeleket lefektették, azt tapasztalták, hogy a kábel egyik végén beküldött rövid és erős (nagy amplitúdójú) morzejel a másik végén elnyúlt, gyenge pittyenésként jelent meg, ráadásul az egymás utáni impulzusok elkezdtek összemosódni. Ennek oka, hogy a kábel szigetelése sosem lehet tökéletes. A kábelben vezetett áram két módon is elszivárog a környező tengervízbe (kisebb mértékben a levegőbe, ha ott fut). A két komponens az elektron-áram és a kapacitív áram, melyek a szigetelés ellenállásától és kapacitásától függenek. Hogy melyik micsoda, abba dzsungelbe most ne menjünk bele.
Az áramot egy kábel úgy vezeti, mint egy kicsit lukas locsolócső, az elszivárgó áramnak a lukakon kifolyó víz felel meg, a kapacitív áramnak pedig a rugalmas cső felfúvódása amikor ráadják a nyomást. Ha egy vízcsapot gyorsan nyitogatunk és zárunk a locsolócső végén (főleg, ha lukas), ugyanúgy lelassult és elgyengült vízlökések jönnek ki, mint egy távírókábelből a jelek. A lényeg az, hogy minél gyengébb a szigetelés (kisebb a drót és a víz közötti ellenállás a drót ellenállásához képest, minél lukasabb a cső) és minél nagyobb a kapacitás (minél rugalmasabb) annál erősebben csökken a jelek amplitudója (mérete) és annál lassabban képes felépülni a jel, azaz annál lassabban terjed (és gyorsabban „kenődik" szét).

Csökkenteni lehet az áram elszivárgás mértékét és ezáltal a jelterjedés hatékonyságát, ha a) csökkentjük a kábel belső ellenállását (vastagítjuk a locsolócsövet), b) növeljük a membrán ellenállását és csökkentjük kapacitását (merevítjük a locsolócsövet és betömjük a lukakat azáltal, hogy körbetekerjük szigetelő szalaggal). A természet a) és/vagy b)



megoldást is alkalmazza (lásd a következő bejegyzésben).
Bármik is az értékek, az idegsejtek nyúlványain (dendriteken és axonokon) a terjedő jel gyengül. A jel gyengülését a hosszállandóval jellemzik. Ez az a távolság, ami alatt a jel erőssége a felére csökken (majd újra a felére és újra a felére, azaz a jel csökkenését egy exponenciálisan csökkenő függvény írja le). Egy átlagos idegsejt dendritnél a hosszállandó 30-100 µm között mozog, azaz egy átlagosan 400-600 µm hosszú dendritekkel rendelkező sejt esetében, a dendritvégekről már jelentős a jel gyengülése a terjedés során. Ennek megfelelően a legerősebb hatásúak a sejttest közelében végződő bemenetek, mivel nem gyengülnek terjedés közben és így hatékonyan járulnak hozzá a sejttesten kialakuló feszültséghez.

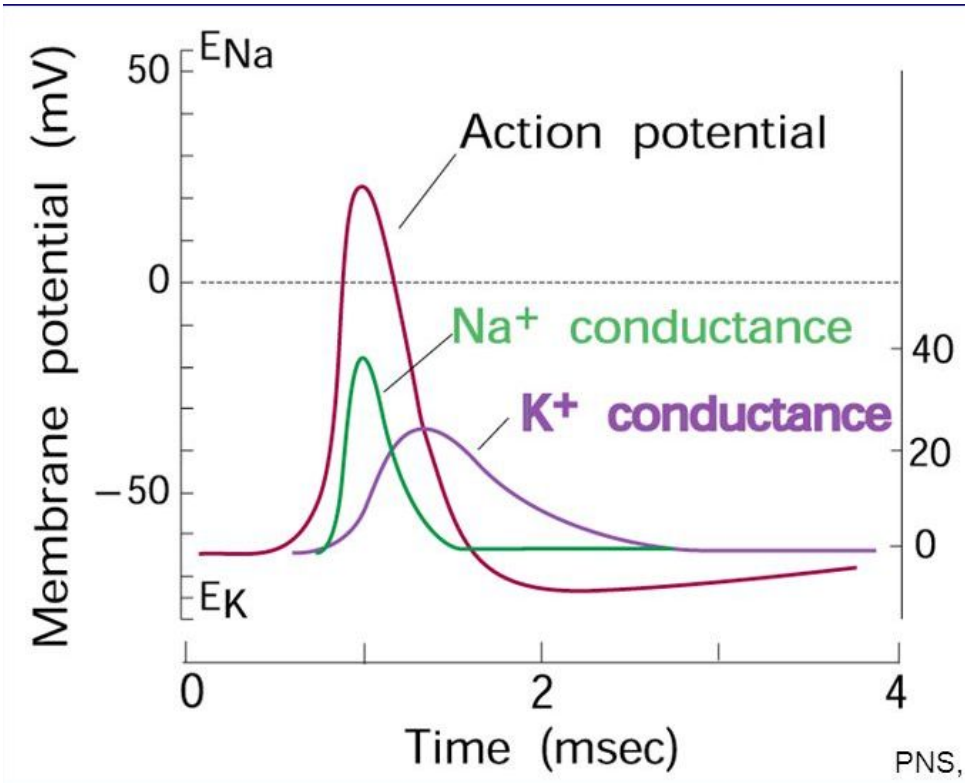
Míg a jelterjedés viszonylag bonyolult, a jelösszegződés nem ennyire (legalábbis alap szinten, fogjuk persze még bonyolítani a későbbiekben). Ahol két áram találkozik (miután a terjedés során gyengült és elnyúlt), összeadódik. Ha ezek az áramok egyenlő előjelűek, pl. két serkentő áram találkozik, akkor erősítik egymást, ha ellenkezőek, mint pl. egy serkentő és egy gátló, akkor csökkentik egymás erősségét. A kérdés az, hogy eléri-e a sejttesten az odáig terjedt és összegzett áramok által kiváltott feszültség az akciós potenciál beindításához szükséges küszöbértéket (~-55mV). Ha igen akkor elindul az axonon egy akciós potenciál. Ebből az egyszerűségből is fakad persze összetettség. Egy idegsejtre több különböző agyi területről érkezik információ. Az agykéregben azt lehet megfigyelni, hogy az idegsejtek dendritfájára az eltérő területekről érkező információ a sejttesttől jellegzetesen különböző távolságokra érkezik. Ennek hatása, hogy az érkező jelek eltérő súlyozással szólnak



bele abba, hogy a sejt mikor tüzeljen (kapcsoljon be). Ugye, ha épp a zebrán akarunk átkelni, akkor jobban figyelünk arra, amit épp látunk, mint arra, hogy milyen zene szól fülünkben, hiszen fontosabb épkézláb átérnünk, mint odafigyelni a zenére.

Miért ugrál terjedés közben az akciós potenciál?

Az idegsejtekből induló dróton, az axonon a jel egy 2msec-ig tartó 80mV-os feszültségugrás formájában terjed. Ez úgy alakul ki, hogy amikor a sejttesten a membránpotenciál értéke (a serkentés eredményeként beáramló Na^+ és Ca^{2+} ionok hatására) kellően pozitívvá válik (tüzelési küszöb ~45mV), akkor feszültségre érzékeny Na-csatornák nyílnak meg és a Na^+ ionok elkezdenek egyensúlyi potenciáljuk (+20mV) irányába áramlani, azaz beáramlanak a sejtbe, pozitívvá teszik azt.



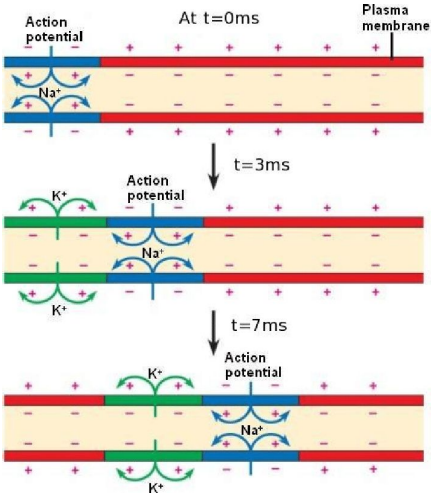
Az akciós potenciál csúcsán a membránpotenciál értéke nagyon közel van a Na^+ ionok egyensúlyi potenciáljához, mivel nagyon sok csatorna nyílt ki (Na^+gyékhoz az egész rokonság megérkezett és mindenki húzza a kötelet). Az akciós potenciál azért nagyon rövid, mert amikor a membránpotenciál pozitív irányba mozdul el, kinyílnak a feszültség érzékeny K^+ csatornák is és a sejtből kiáramló K^+ ionok (egyensúlyi potenciáljuk -120mV) csökkentik a sejt belsejében a pozitív töltést. A nagy bulit látva K^+

ovácsékhoz is megérkezik a rengeteg rokon, hogy visszacibálják a ponyvát. A membránpotenciál visszatér a nyugalmi szintre (-60mV). Persze a beáramlott Na^+ és kiáramlott K^+ ionokat az ioncserélő pumpák elkezdik vissza pumpálni. Mivel itt a koncentráció különbség ellen kell dolgozni, ezek a pumpák a sejtek valutáját az ATP-t használják fel. Igen sokat. A membránpotenciál fenntartása nagyon energiaigényes. Egy ember nyugalmi állapotban 100W energiát használ, ennek 20% át agyunk fogyasztja.
Az akciós potenciálnak azonban nem csak kialakulnia kell, hanem hatékonyan és gyorsan terjednie. Alap esetben a kialakult pozitív feszültség a fentebb részletezett módon (mint a kábelben a jel) terjed és terjedés közben legyengül, de közben további Na és K csatornákat nyit. Ez újra és újra történik, de mivel erős a gyengülés a jelterjedés viszonylag lassú. Ez a

lassú terjedés nagyon hasonlít a focimeccseken a közönségben kialakuló hullámokra.



Music – 1987 – Lost In A Fury Of Waves And Cluster – Who Ya Gonna Call – Wave Busters – ImaSportsphile



De hogyan lehetne ezen gyorsítani? Mint az előző bejegyzésben láttuk, erre két megoldást is adódik. A természet mindkettőt használja (akár egyszerre is).

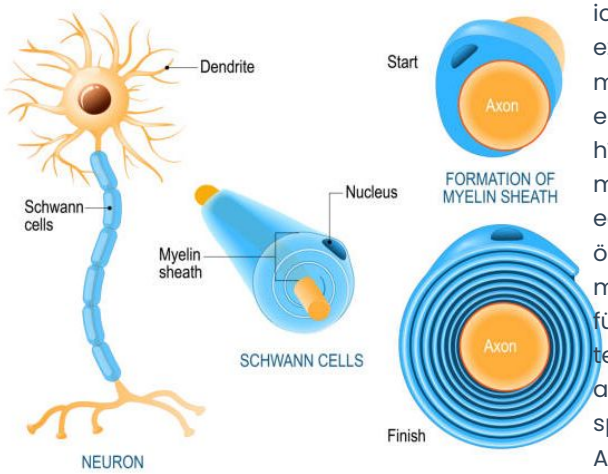


Amikor Hodgkin és Huxley elvégezték Nobel díjat érdemelt kísérleteiket az idegsejtek membránpotenciáljának kialakulásáról és a jelterjedésről, egy igen furcsa kísérleti modellt használtak. A tengeri puhatestűek egyik képviselője a kalmár. A tintahal rokona, 10 karja van és vízsugár meghajtással közlekedik. Az átlagember panírozott vagy grillezett kalmár karikák formájában találkozik csak ezzel a tetszetős állattal. A kalmárra sokan vadásznak, ezért gyors menekülési reflexre van szüksége. Ahhoz, hogy nagy szemétől a menekülésre serkentő jel nagyon gyorsan jusson el a sugárhajtását vezérlő izmokig, a kalmár egy igen vastag óriásaxont használ. Ugyanis, ha egy nyúlvány vastag, nagy a keresztmetszete, akkor kis ellenállással tudja hosszában az áramot vezetni.

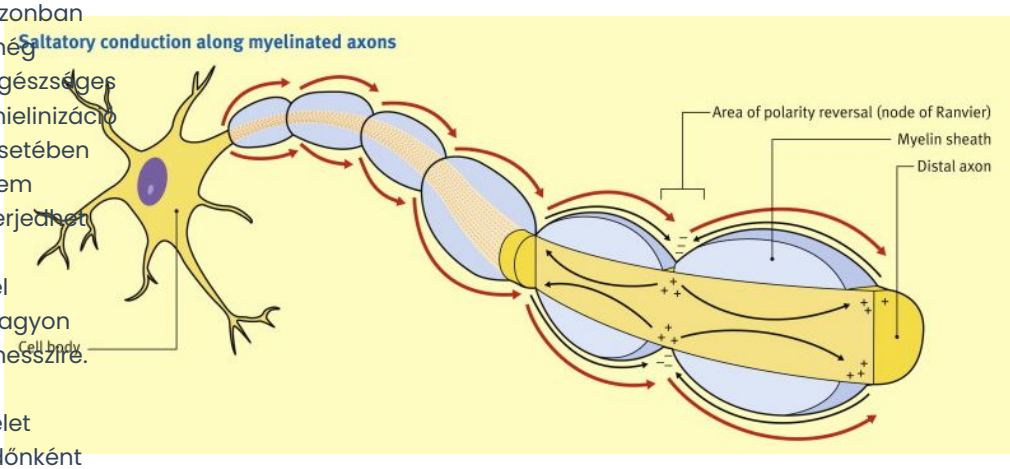


Míg egy emberi idegsejt axonjának átmérője 0.2 um, addig a kalmár óriásaxon átmérője 1.5mm (1500um), azaz 7500x nagyobb is lehet. A 1.5mm átmérőjű óriásaxon remek lehetőséget adott a kutatóknak, hogy belső és külső ionkoncentrációit megmérjék és az akciós potenciálok terjedési mechanizmusát megértsék.
Egy vékony szigeteletlen axon, mint amin például a meleg érzet terjed karunktól a gerincvelőig, 0,5-2,0 m/s sebességgel, azaz 2-7 km/órával, gyalogtempóban vezeti a jeleket. A legnagyobb sauropoda dinoszaurus az Amphicoelias 40-60 méter hosszúra nőtt. Egy ilyen axonon a farka végétől a fejéig egy jó fél percig terjedt az információ. Ha belelógott a lávába a farka akkor ropogósra sülhetett mire észrevette. A kalmár óriásaxonján, vastagsága miatt már 25 m/s-al, azaz 90 km/h-val, egy közúti autó sebességével terjed a jel.

Az emlősök agyuk jelterjedésének felgyorsítására egy jelentősen gazdaságosabb megoldást alkalmaztak. Szigetelték vékony axonjaikat! Ezt úgy érik el, hogy az idegsejtek axonjára a Schwann sejt nevű segítő gliasejtek ellaposodó nyúlványa többszörösen rácsavarodik, mintha szigetelőszalaggal tekerné körbe az axont. Az 5-6 rétegű megkettőzött



sejthártya (melyben nincsenek ioncsatornák) nagyon jó szigetelő, ezért az axonon jelentősen messzebbre terjednek az elektromos áramok. Ezt a struktúrát hívják mielin hüvelynek és mindenhol megtalálható, ahol egymástól távoli területeket összekötő pályák futnak. A mielinizált axonokon (átmérőjüktől függően) már 20-80 m/s-al terjednek a jelek. Ez gyorsabb, mint a kalmár vastag axonján, egy gyors sportkocsi sebessége (290km/h). Az idegrendszer leépülésével járó sclerosis multiplex (SM) oka, hogy valami ismeretlen folyamat eredményeként az immunrendszer sejtjei megtámadják a mielin hüvelyt és mint egy géppromboló horda leszaggatják a szigetelést az idegpályákról. Nem csoda, hogy az SM első tünete fáradékonyság, végtagzsibbadás, mely később bénuláshoz, vaksághoz vezethet, hiszen a sejtek elvesztik hatékony jeltovábbítási rendszerüket.



Azonban még egészséges mielinizáció esetében sem terjedhet a jel nagyon messzire. A jelet időnként fel kell erősíteni. Az idegrendszer ezt úgy oldja meg, hogy az axonon a mielinhüvely

időnként megszakad és ezen a ponton (amit felfedezője után Ranwier-csomónak neveznek) az axon kicsit megvastagodik és rengeteg, az akciós potenciál generálásához szüksége Na^+ és K^+ csatornát épít be a sejthártyájába. Az idáig elérő, csillapodott jel újra kivált egy akciós potenciált és szalad tovább. Ezt a szakirodalomban szaltatórikus, azaz ugráló vezetésnek hívják. Kicsit olyan, mint amikor a forró nyári biciklitúrán a lelassult kerékpáros megáll a kocsmánál és vérmérséklete szerint vizet vagy sportfröccsöt elfogyasztva újult erővel indul tovább. Egy ilyen axonon akár 120 m/s-al, azaz 432 km/h-val, egy gyorsulófélben levő repülő sebességével terjedhetnek a jelek. Nincs annyi fröccs, amitől egy biciklista ilyen gyorsan tudna menni.

Mesterséges idegsejtek: hogyan írják le a matematikusok az idegsejtek jelfeldolgozását?

Az #agyséta előző cikkeiben egyszerűen, majd részletekbe menően is átvettük, hogy egy biológiai idegsejt hogyan összegzi a rá érkező ingerületeket és a kiváltott válaszjel hogyan terjed. Most azt mutatom be hogyan lehet egyszerű matematikai leírását adni egy idegsejt jelintegrációjának. Sajnos sokan ódzkodnak a matematikától, pedig tudni kell, a matematikus alapjában lusta, így mindig a legegyszerűbb leírását próbálja adni egy problémának. Sokan ott buknak el, hogy ehhez a matematikus a saját nyelvét, a képletekkel leírt egyenleteket használja.

$$I = C_m \frac{\mathrm{d}V_m}{\mathrm{d}t} + \bar{g}_{\mathrm{K}} n^4 (V_m - V_K) + \bar{g}_{\mathrm{Na}} m^3 h (V_m - V_{Na}) + \bar{g}_l (V_m - V_l),$$
$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n(V_m)(1-n) - \beta_n(V_m)n$$
$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m(V_m)(1-m) - \beta_m(V_m)m$$
$$\frac{dh}{dt} = \alpha_h(V_m)(1-h) - \beta_h(V_m)h$$

Hodgkin és Huxley Nobel díjat érő differenciál egyenlet rendszere.

Az idegsejtek vizsgálatának hőskorában a biológusok megfigyeléseit a matematikusok és fizikusok igyekeztek egyenletek formában megragadni. A fenti hihetetlenül bonyolult fizikai kémiai folyamatokat sikerült Hodgkin-nak és Huxley-nak differenciál egyenletekkel leírni, amit Nobel díjjal jutalmaztak 1963-ban. Ez egy pontos, de még mindig bonyolult leírása volt az idegsejtek működésének.

A számunkra emészthetőbb leírást McCulloch és Pitts alkotta meg 1943-ban (MCP modell). Ez volt az első mesterséges idegsejt (neuron) modell. Mindössze ennyi:

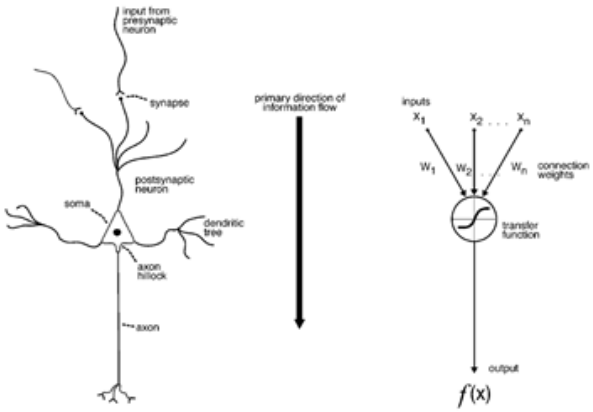
$$u = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \quad \text{·és·} \quad y = \begin{cases} 1 & \text{if } u \geq \theta \\ 0 & \text{if } u < \theta \end{cases}$$

McCulloch és Pitts idegsejtek jelfeldolgozását egyszerű formában leíró egyenletei. Bal oldalt a sejtre érkező bemenet kiszámolása, jobboldalt az erre adandó válasz kiszámolása.

Ugye minden modell, így az idegsejtmodell is, a valóság leegyszerűsítése, hogy bizonyos kérdésekre hatékonyabban és/vagy egyszerűbben lehessen válaszolni. Persze mint minden modellnél, tisztában kell lennünk azzal mit építünk be, mit dobunk ki. Ez be is határolja, hogy mit kérdezhetünk (és fordítva, a kérdés szabja meg mennyire egyszerűsítünk). A mesterséges ideghálózatok és az általuk használt idegsejtek esetében nem a biológiai

hűség, hanem a **tömör matematikai leírás a cél**, hogy könnyen számolhassuk az elemek működését és hatékonyabban tudjunk számítógépeken mesterséges idegsejteket és idegsejt hálózatokat szimulálni (vizsgálni). A mesterséges idegsejt és hálózat modellek a skála egyik végén álló egyszerű MCP sejttől a biológiai sejtre igen hasonlító összetett jelintegráló modell rendszerig folyamatos skálát alkotnak.

De fordítsuk le mi van odafent a legegyszerűbb leírásban. Egy idegsejt számos (~10,000) bemenetet kap más sejtek axonvégződéseitől. A preszinaptikus sejt axonjáról érkező bemenetek értékét az **x1**, x2, ...x10000 változókban tárolhatjuk egy modellben. Hogy az axonról érkező bemenet milyen erősen adódik át a beidegzett sejt dendritjére, azaz azt a szinapszis mennyire erősíti, a **w1,** w2, ... w10000 változókban található (szinaptikus súlyok, az angol weight=súly rövidítése) tartalmazzák. A **∑** (nagy szigma, jelentése szumma) azt jelenti, hogy ahhoz, hogy a sejtre érkező bemenetet megkapjuk, össze kell adnunk az összes bemenetre a bemenet értékét megszorozva a szinaptikus súllyal **(x1*w1)+(x2*w2)*.... (x10000*w10000)**. Hiszen a sejttesten a dendritekből érkező bemenő áramok összegződnek. A második egyenlet pedig azt jelenti, hogyha az összeg, **u**, nagyobb, mint a küszöb **Θ** (theta az angol threshold = küszöb görög rövidítése), akkor a sejt kimenete (**y)** 1 lesz, különben marad 0 (a valódi idegsejt esetében kisül a sejt vagy nem).
Ezen egyenletek alapján, viszonylag alacsony számításigénnyel lehetett hatékonyan számolni kis neuronhálózatok működését. Bár ekkor még nem léteztek számítógépek. Ezek elméleti megalapozását Alan Turing elmélete alapján Neumann János dolgozta ki az EDVAC jelentésben.



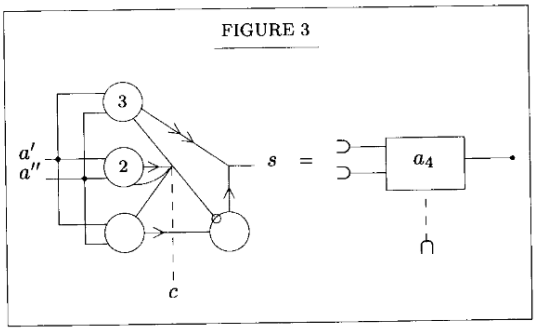
Egy biológiai (bal) és egy modell (jobb) idegsejt rajza.

Az agy és a számítógép kapcsolatának érdekes csavarjaként az első általános célú

számítógép elemeinek megtervezésénél Neumann felhasználta McCulloch és Pitts absztrakt neuronjait. Nem is csoda, hiszen egy kevés bemenettel rendelkező idegsejt jelintegrációja nem áll messze egy logikai művelet elvégzésétől. Ha sejtünknek két bemenete van és aktiválódási küszöbe 2 akkor az ÉS (AND) logikai műveletet képes elvégezni, azaz csak akkor lesz aktív, ha mindkét bemenete aktív. Ha a sejt aktiválódási küszöbe csak 1, akkor bármely bemenet aktiválódása esetén aktív lesz, azaz egy VAGY (OR) műveletet végez. Egy NEM (NOT) logikai műveletet pedig egy egyetlen bemenetű, 1 küszöbű gátlósejttel lehet leírni. Ennek a 3 elemnek a használatával pedig bármely logika függvényt fel lehet építeni egy kis neuronhálózatból.

7.3 We proceed to describe an *adder* network: Figure 3. The two addends come in on the input lines a', a'', and the sum is emitted with a delay 2τ against the addend inputs on the output line s. (The dotted extra input line c is for a special purpose which will appear in 8.2) The carry digit is formed by ②. The corresponding digits of the two addends together with the preceding carry digit (delay τ!) excite each one of ◯ (left), ②, ③ and an output stimulus (that is a sum digit 1) results only when ◯ is excited without ②, or when ③ is

FIGURE 3

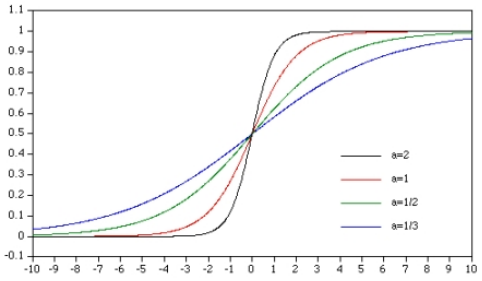


Egy ábra Neumann János meghatározó jelentőségű kéziratából, mely a formális idegsejtekől álló összeadó egységet mutatja be.

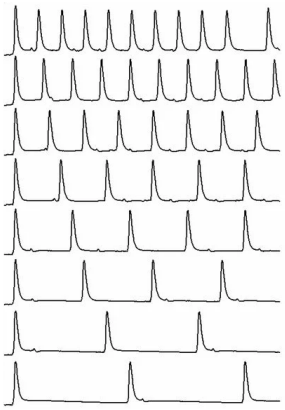
Ilyen neuronokból építette fel terveiben Neumann a feldolgozó egység összeadó, szorzó, osztó, gyökvonó és egyéb elemeit, illetve a memóriát és a vezérlést. Utána pedig a mérnökök tranzisztorokból alakították ki az idegsejtek számításain alapuló logikai kapukat.

A legegyszerűbb idegsejt modellt (MPC) „integrate and fire" modellnek hívják (összegyűjt és aktiválódik). Az elméleti szakemberek hamar rájöttek arra, hogyha az idegsejtek kimenete nem bináris [0 vagy 1] hanem folytonos [0 és 1 közötti], illetve, ha a válaszfüggvénye (az összegzett áram hogyan alakul válasszá) nem egy hirtelen ugrás 0-ról 1-re, hanem egy nemlineáris függvény, akkor sokkal kifinomultabb számításokra képes egy modell idegsejtekből álló hálózat. A folytonos esetet biológiában úgy lehet elképzelni, hogy a sejtnek nem csak tüzel/nem tüzel állapota van, hanem különböző gyakorisággal (frekvenciával) is bocsájthat ki akciós potenciálokat. A nemlineáris pedig azt jelenti, hogy kétszer, négyszer akkora bemenő jelre nem kétszer, négyszer akkora lesz a válasz, hanem ennél nagyobb (supralineáris, vagy kisebb (sublineáris).

A fizikában az ilyen nemlineáris bemenet-kimenet esetre leggyakrabban a sigmoid függvényt (görbét) használják. Történetesen az idegsejtek is ilyen szigmoid aktiválódási küszöbbel bírnak. A szigmoid görbe egy ideig vízszintesen fut minimális értékén (nem változik), aztán egy küszöbértéknél elkezd emelkedni, az egyedi görbékre jellemző meredekséggel fut felfelé, majd újra kilaposodik a maximális értéknél. Egy idegsejt is amíg nem kap jelet, vagy nem kap elég erőset, nem aktiválódik, aztán a jel erősödésével egyre aktívabb lesz, de aktivitása nem tud a végtelenségig nőni, egy ponttól fogva maximális gyakorisággal bocsájtja ki az akciós potenciálokat, bármi is történik. A görbe meredeksége azt befolyásolja mennyire finoman vagy durván emelkedik a sejt aktivitása a bemeneti jelerősség függvényében. Az indulási pontja pedig megfelel a sejt tüzelési küszöbének. Tulajdonképpen a 0/1 küszöbfüggvény a szigmoid görbe egy



Különböző meredekségű (eltérő) szigmoid bemenet-kimenet görbék ábrája. A vízszintes tengelyen a bemenő aktivitás, a függőlegesen a rá adott válasz van feltüntetve.



Növekvő serkentésre (alulról felfelé) egy idegsejt egyre nagyobb frekvenciájú akciós potenciál sorozattal válaszol.

szélsőséges alakja, ahol a meredekség a küszöbnél végtelenül nagy, a minimum érték 0, a maximumé pedig 1.

Ezen a ponton (valahol az 1960as években) aztán hosszú időre el is vált egymástól a fizikusok és agykutatók útja. A kezdeti ihlet után a fizikusok rengeteg dologra kezdték el használni a formális neuronokat és mindenféle ravasz módosításokat eszközöltek azért, hogy hálózataik jobban viselkedjenek (azaz bonyolultabb és gyorsabb számításokat tudjanak kiegyensúlyozottan elvégezni). Megjelentek olyan „neuronhálózatok" amelyek már igencsak elrugaszkodtak a valós biológiai alapelvektől. Kialakultak egzotikus nevű megoldások, mint például a Perceptron.
Az egyik ilyen újítás volt a „backpropagation"- visszaterjedés. Itt az idegsejtek nyúlványrendszerén a jel nem csak a biológiában megengedett szinapszis->dendrit->sejttest->axon irányba terjedhet, hanem visszafelé is. Ebben a rendszerben speciális szinaptikus tanulási szabályokat is beépítettek, ami az agyban nem található meg. A másik, biológiailag nem helyes megoldás az volt, hogy egy sejtnek nemcsak pozitív, hanem negatív szinaptikus súlyai is lehettek, azaz bizonyos kimenetei serkentők, mások gátlók voltak, sőt ezek át is válthattak egymásba. Mint írtam, az agykéregben az idegsejt típusa határozza meg hogy serkentő vagy gátló kapcsolatokat alkot axonterminálisaival. Mivel, mint majd a későbbiekben látni fogjuk, a két sejttípus alapvetően más szerepet tölt be az információ feldolgozásában.

Az eltérésekbe itt most nem megyünk bele, mert a tanulásról és sok másról majd a következő részben a hálózatoknál lesz szó. Ott pillantást vetünk majd a modell idegsejtekre és hálózatokra is, illetve, hogy amikor a mesterséges intelligencia kutatók újra az agykutatókhoz fordultak ihletért, miket vettek ám ami a jelenlegi Deep Learning AI forradalomhoz vezetett.

Szerző: **Gulyás Attila**

A két lábra állás meséje: az energiazabáló agy.

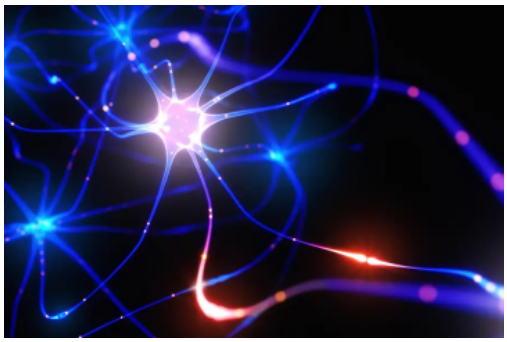
A sok kemény tény után lazítunk egyet, egy mesélősebb résszel.
Agyunk a testméretünkhöz képest a többi élőlényhez viszonyítva hatalmas (bár a Neandervölgyi embernek térfogatra nagyobb volt). Ráadásul nem csak hatalmas, hanem energiazabáló is. Egy ember nyugalomban 100W energiát használ, kb. mint egy erős régimódi villanykörte, vagy mondjuk egy lakás teljes LEDes kivilágítása. Ezt hő formájában adjuk le a környezetünknek, ugyanúgy, mint laptopunk. Ezért van az, hogy egy nagy előadótermet, amiben sok ember van, nem fűteni, hanem hűteni kell. 10 ember 1kW, 100 ember 10kW (mint 3 keményen dolgozó villanyradiátor). Ha nekiállunk sportolni hőleadásunk felmehet 3-400W-ra is.

Agyunk nyugalmi energiafelhasználásunk jelentős részét, 20%-át éli fel, egyötödét. Függetlenül attól, hogy alszunk, keményen gondolkodunk, meditálunk, lazítunk, mindig nagyjából ugyanannyi energiát használ fel. De miért kell neki ilyen sok energia és miért kb. mindig ugyanannyi? Az idegsejtek működésének alapvonása, hogy elektromos feszültség alakul ki sejthártyájuk belső és külső felszíne között. Mint a membránpotenciál kialakulásánál írtuk, ez annak következménye, hogy a sejten belül és kívül jelentősen eltér az

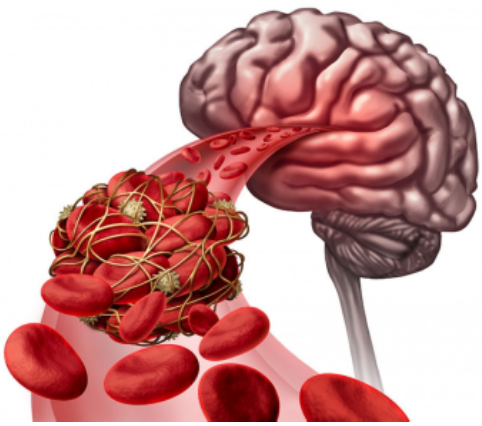


Brain in a lightbulb

egyes ionok mennyisége (koncentrációja). Ezt a sejtek úgy érik el, hogy a sejt belsejéből kipumpálják a Na^+ ionokat és bepumpálják a K^+ ionokat (a két meghatározó ionfajtát). A pumpák működtetéséhez nagyon sok ATP-t, a sejt energiavalutáját kell elhasználni. Egy ATP molekula elhasználásával 3 Na^+ és 2 K^+ iont mozgat a sejt. De honnan jön az ATP? Az idegsejtekben cukor égetésből keletkezik. Egy glukóz molekula elégetésekor 36-38 ATP molekula keletkezik. Azt most ki nem számolom, hogy egy idegsejtnek mennyi K^+ és Na^+ iont kell mozgatnia, de sokat, szóval sok cukorra van szüksége és ezért sok energiát szabadít fel hő formájában.

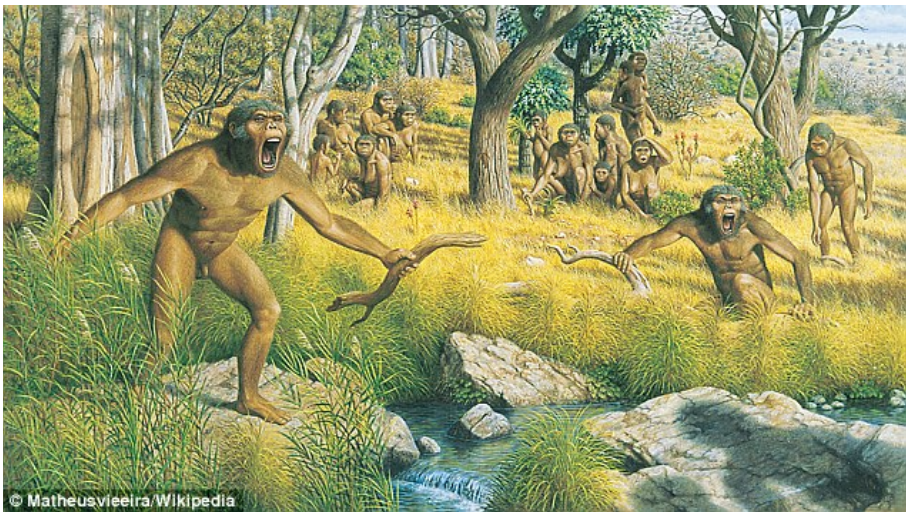


De miért igényel annyi energiát függetlenül attól, hogy lemegyünk alfába vagy matek érettségit írunk? Azért, mert a sejtek dendritjein és sejttestének felszíne jelentősen nagyobb, mint az axonok felszíne. Azaz, a sejt felszínén fenntartani a membránpotenciált jelentősen több ionpumpálást igényel, mint a sejtek aktiválódását jelentő, axonokon futó akciós potenciálok után visszaállítani az ionokat. Tehát, egy sejt a jelösszegzésre kb. ugyanolyan sok energiát használ el, függetlenül attól, hogy aktiválódik-e vagy nem. Az idegsejteknek a membránpotenciált mindig fenn kell tartaniuk, ha alszunk is. Ha egy idegsejt nem tudja fenntartani a membránpotenciálját, akkor működése komoly károsodásokat szenvedhet.



Amikor baleset vagy betegség következtében (szívleállás, fulladás, ütés a fejre, agyvérzés, agyérgörcs), időlegesen megáll a véráramlás és ezzel az agy oxigénellátása, a sejtekből pillanatok alatt elfogy az ATP, lekapcsolnak az ionpumpák, összeomlik a membránpotenciál és megáll a sejtek, az agy működése. Még ha időben újra is indul az oxigénellátás, a sejtekben olyan folyamatok indulnak be, amelyektől idővel epilepszia alakulhat ki az agyban, mely további sejtkárosodást és pusztulást okoz. Nagyon fontos tehát az agy állandó vérellátása. Ezért kell az ájult vagy ájulás közeli embert (ha fehérájulásról, elsápadásról van szó) lefektetni és lábát feltámasztani, hogy a vér inkább az agyába áramoljon.

Szó mi szó az agynak rengeteg energia kell és ezért rengeteg hőt is szabadít fel. Erről szól mesém második része.



Őseink amikor Afrikában 3-4 millió éve lemásztak a fáról - ugyanis elfogytak alóluk a fák, mert az esőerdők a felmelegedés miatt szavannákká (gyéren fás, füves pusztákká) alakultak – egy hihetetlenül forró, száraz élőhelyen találták magukat. Ez számos kihívás elé állította őket. A bőséges, energiát szolgáltató gyümölcstermő fák eltűntek. Árnyékukkal együtt.... Őseinknek meg kellett tanulniuk új táplálék után nézniük és túlélni a tűző napon. Van egy mondás: „Ami nem öl meg az erősebbé tesz!". Nos őseink közül nagyon sokat megölt az evolúciós szelekció, mire alkalmazkodtak a szavannai életmódhoz, de sokkal erősebbek lettek a végére. Nemigen van még egy olyan faj, amelyik ekkora átalakuláson ment keresztül ilyen rövid idő alatt.

Szervezetünkben rengeteg átalakulás történt: két lábra álltunk, elvesztettük szőrzetünket, jelentősen megnőtt agyunk térfogata. Ez a három dolog rengeteg szálon függ össze egymással, de az agytérfogat növekedéséhez elengedhetetlen volt a két lábra állás és a megcsupaszodás. De miért is? Járjuk körbe a kölcsönhatásokat.

A biológiában van egy megfigyelés. A táplálékspecialisták (leggyakrabban növényevők, azok közül is, akik egyféle táplálékot fogyasztanak) buták. Kicsi az agyuk, a ragadozók mérsékelten okosak, a mindenevők pedig a legokosabbak. Ha egy állat bonyolult közösségekben él még okosabb. Melyik az okosabb? A koala vagy farkas? A birka vagy a disznó? A tengerimalac vagy a makákó? A tyúk vagy a varjú? A galamb vagy a papagáj? A panda vagy a barnamedve? Ha bent ülsz egy bambuszerdő közepén vagy egy eukaliptusz ligetben akkor csak ki kell nyújtsd a karodat és ott a táplálék. Nem csoda, hogy a koala agya hihetetlen mértékben összezsugorodott. Ha vadásznod kell, főként ha csapatban, szükséged van az agyadra. De a legnagyobb szükséged akkor van az agyadra, amikor nehéz körülmények között, abból kell megélned, amit találsz és elkapsz! No ezek a mindenevők, akik mindenhova benéznek, emlékeznek rá hol volt a múltkor a fincsi hernyó, feltúrják amit kell. Ehhez nagy agy kell (és ügyes mancs vagy csőr)! A társas kapcsolatokhoz, márpedig őseink



abban éltek, még nagyobb.

> *Mellékszál, de a fenti viselkedés-agyméret összefüggés nagyon jól látszik a kései ember evolúció során is (lásd Jarred Diamond könyveit). A 10-40ezer évvel előttünk élő vadászó-gyűjtögető őseink agya kicsivel nagyobb volt, mint a földművelés feltalálása óta élő földművelő őseinké. Hiszen kevesebb intelligenciát igényel búzát termeszteni, a földet túrni, mindig ugyanott, mint hatalmas területeket bejárni és ravasz módokon megkeresni mit is együnk ma? Arról nem is beszélve, hogy a halász-vadász csontvázleletek sokkal erősebbnek és egészségesebbnek bizonyultak, mint a későbbi földműves csontvázak. Sok ember élt egy csoportban, sok volt a betegség és a földtúrás megnyomorította őket.*

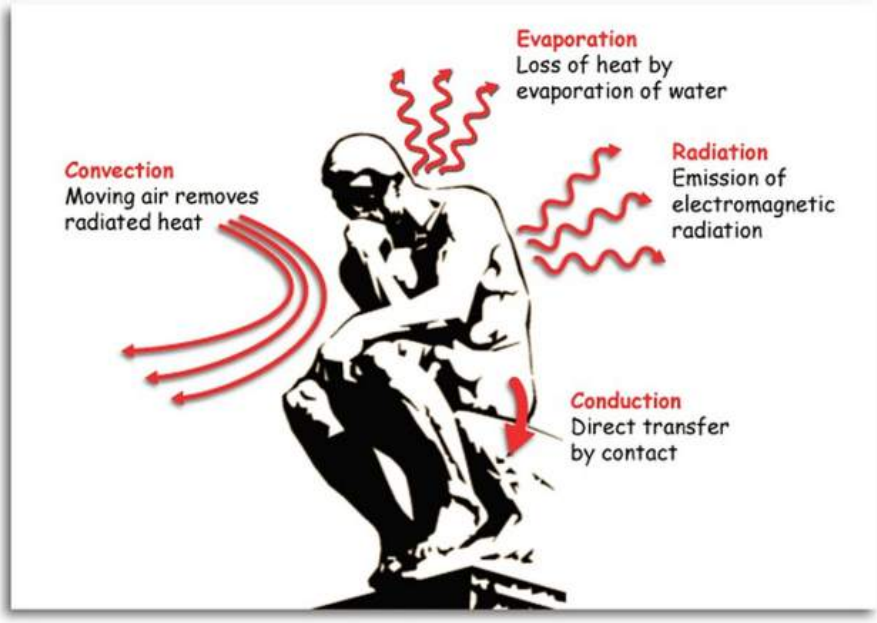
Folyt köv...

Szerző: **Gulyás Attila**

A két lábra állás meséje: mi kell egy nagy agyhoz?

Tehát, ahhoz, hogy afrikai őseink 4 millió évvel ezelőttől a táplálékban szegény szavannán meg tudjanak élni, mindenevőkké kellett válniuk és ezért nagyobb agyra volt szükségük. Az agynak pedig sok energiára, táplálékra van szüksége és hőleadása miatt nagyon kell hűteni! Itt van egy körkörösség, mert ugye a több táplálékhoz nagyobb agy kell, annak meg több táplálék. De a két dolgot szépen összecsiszolta az evolúció. A gyümölcsökben sok a cukor, sok az energia. De ugye az már nincs... Ezért őseink rákaptak az állati fehérjére és még inkább az állati zsiradékra. Ennek megszerzése persze megint nagyobb agyat igényel 😊.

De térjünk át a hűtés kérdésére. Agyunk csak úgy lehetett nagyobb, ha közben elegendő hőt tudott leadni. Evolúciónk során mind a két lábra állás mind a szőrzet elvesztése segített ebben. Úgy tűnik, a két lábra állásnak több előnye is volt. Egyrészt, a magas fűben messzebbre lehetett látni felegyenesedve, másrészt, két lábon egy idő után energiatakarékosabban lehet járni, illetve a kezünk is felszabadult arra, hogy utódainkat és szerszámainkat cipeljük. De történetünk szempontjából a felegyenesedés azért jelentős, mert aki áll, annak kisebb részét süti a nap (pláne a magasan járó trópusi) mint aki négy lábon jár. Hogyan szoktak az emberek napozni? Állva vagy fekve? Na ugye!



A hőleadás 4 módja.

A hűtés másik eleme szőrzetünk elvesztése és ezzel párhuzamosan annak a megszerzése volt, hogy egész testfelszínünkön tudunk izzadni. Hőt leadni többféle módon lehet. Hősugárzással, hővezetéssel, áramlással és párologtatással. Az afrikai szavannán napközben a hősugárzás és vezetés nemigen működik, mivel környezetünk melegebb, mint mi. Marad az áramlás (a levegő elviszi a hőnket), illetve a még hatékonyabb párologtatás, ahol a testfelszínünkre került víz elpárolgása során magával visz rengeteg hőenergiát. Ahhoz, hogy testfelszínünkről hatékonyabban áramoljon el a hő és könnyebben párologjon el a nedvesség a szőrzet elvesztése egyértelmű előny. Azaz, erős evolúciós nyomás volt arra, hogy megcsupaszodjunk. Kevésbé bundás őseink később kaptak hőgutát mint a bundások, ezért több kevésbé szőrös utódjuk lett. A szőrzet elvesztésének másik előnyét jómagam is megtapasztaltam amikor Ausztráliában a Daintree esőerdőben túráztam a feleségemmel. Itt évente 11 méter eső esik és tele van az erdő apró piócákkal (értsd szőrős a föld tőlük). Amikor valaki közeledik érzik a léptei dobogását és vad körzésbe kezdenek, hogy nagyobb eséllyel tapadjanak áldozatukra. Ránk is jutott bőven. Amikor elkezdtük egymásról leszedegetni őket, feleségemnek jelentősen nehezebb dolga volt, mint nekem, mert az én szőrős karomon és vádlimon nagyon hatékonyan el tudtak bújni a szőrszálak között, nehezebb volt felcsippenteni őket, mint az ő csupasz bőréről. A paraziták pedig komoly evolúciós hajtóerőt tudnak felmutatni.

Izzadás: Az ember hihetetlen hatékonyan izzad. Nemigen van még állat, aki egész testfelszínén tud izzadni. A kutyák csak a talpukon tudnak izzadni, ezért a hőleadást lihegéssel oldják meg. Tüdejükben párologtatják el a vizet. Vannak olyan állatok is, például az ausztráliai sivatagban élő kenguruk, akik szőrüket nyalogatással nedvesítik és így hűtik magukat. De ezeknek a megoldásoknak a hatékonysága jelentősen alulmúlja az izzadását.
Nehéz elhinni, de a hatékony hűtés miatt, olyan mértékben alkalmazkodtunk a hosszútávú gyalogláshoz és futáshoz, hogy egy ember tartósan hosszabb távot képes



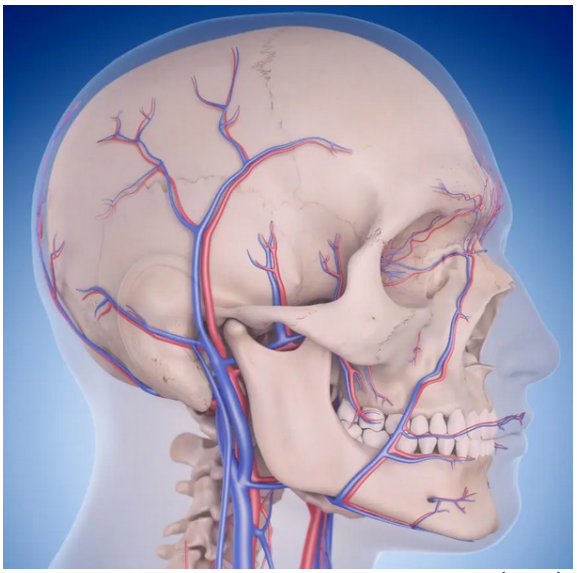
Erősen izzadó emberi bőrfelület.

megtenni naponta, mint egy ló vagy egy farkas. Őseinkhez hasonlóan a kalahári sivatagban élő khoisan vadászok még ma is addig követik a gazellát amíg az túl nem hevül és mozdulatlanul el nem dől.

Az ember élettanában számos más is segítette az agy hatékony hűtését. Ugye a felegyenesedés miatt testünkre már nem jutott annyi napfény, de a gerincoszlopunk végén egyensúlyozó koponyánkra igen. Ezért ezen megmaradt a hőszigetelés, itt nem kopaszodtunk meg, hanem az afrikaiakra jellemző rövid göndör hajunk alakult ki. A göndör haj átszellőzik, így alatta a fejbőr tud párologtatni, de közben vékonyan takarja a fejet a nap ellen. A másik adaptáció (alkalmazkodás) ami történt az az agy, a koponya és a fejbőr vénás (vivőeres) vérkeringésének átalakulása volt. Biztos mindenki látott már fejbőr sérülést, ami nagyon erős sötét színű vérzéssel jár. Ez ijesztőbbnek látszik, mint amennyire veszélyes. A fejbőrben ugyanis sokkal több az ér, mint ami táplálásához szükséges. Az agyból kilépő felmelegedett vénás vér a koponyacsont alatt, illetve részben a koponyából kilépve a fejbőr alatt áramlik és mint egy hősugárzó leadja a felesleges hőenergiát, majd a nyakban, az agyat tápláló artériák mellett futva, lehűti az azokban áramló vért. Így az agy hűtött vért kap.



Khoisan vadász, fején az afrikaikra jellemző rövid göndör haj.



Az ember koponyájának felszínén futó artériák (piros) és vénák (kék) ábrája. A fejbőr alól visszatérő, lehűlt vért szállító vénák az agyat tápláló artériák mellett futnak és előhűtik az agyba lépő vért.

Hatalmas agyunknak az energiaéhségen kívül van még egy nagy ára. A modern orvostudomány kialakulása előtt a szülések 1.5%ba belehalt az anya. Ha beleszámítjuk, hogy általában sok gyereket szültek a régi időkben, a nők 4%-a halt meg szülésben. Ennek oka, hogy az ember újszülöttjének hatalmas a koponyája, még úgy is, hogy a legtöbb emlőshöz képest fejletlenül születik. Ez nyilván egy erős szelekciós nyomás és megmagyarázza a nők csípője miért szélesebb, mint a férfiaké.

Legközelebb visszatérünk az elektrofiziológiához, majd az elektronmikroszkópokhoz.

Szerző: **Gulyás Attila**

Dadusok és bestiák: Felvezetés

Hú de rég volt már #agyséta. Kicsit elhanyagoltam a sok esemény hatására, hogy az agyműködést bemutató útvonalon haladjunk.
Nos, túl vagyunk azon, hogyan alakultak ki az idegsejtek, hogyan fogadják, összegzik és adják tovább az ingerületet, illetve remélhetőleg megemésztettük azt is, hogyan lehet működésüket egyszerű egyenletekkel leírni és ezáltal számítógéppel modellezni. De, mint majd látjuk a most induló minisorozatban, az agy és benne az idegsejtek ennél jóval bonyolultabbak. Körülbelül ott tartunk, hogy elmagyaráztuk hogyan működik és hogy néz ki egy korábbi korszak népautója a Trabant. Ha ennél a hasonlatnál maradunk agyunk valós idegsejtjei inkább egy önvezető, szépen megtervezett, kifinomult autóra hasonlítanak, a világra kiterjedő kommunikációs és szervízhálózattal, autómentő villámszolgálattal.



Trabant fényképe

Mielőtt tovább lépnénk a következő szerveződési szintre, ahol megvizsgáljuk az idegsejtekből összeálló hálózatok viselt dolgait, be kell mutassam, hogy az idegsejtek milyen extrákkal és szervízhálózattal rendelkeznek, azaz milyen eddig be nem mutatott további kölcsönhatásokba léphetnek még egymással és a környezetükkel. Ez fontos lesz annak megértésében, hogy a hálózatok viselkedése hogyan módosítható. Bár tudjuk egy embernek élelmiszerre, lakásra, szórakozásra van szüksége, de ahhoz, hogy megértsük, hogyan működik egy társadalom meg kell ismernünk azt is, hogy az emberek hogyan és milyen típusú kölcsönhatások útján lépnek kapcsolatba más emberekkel és társadalmi szerveződésekkel (adóhivatal, munkahely, stb.). Hiszen embertársaik és hivatalaik rengeteg finom és kevésbé finom módon tudják befolyásolni viselkedésüket, amiktől döntéseik, irányultságuk megváltozhat.

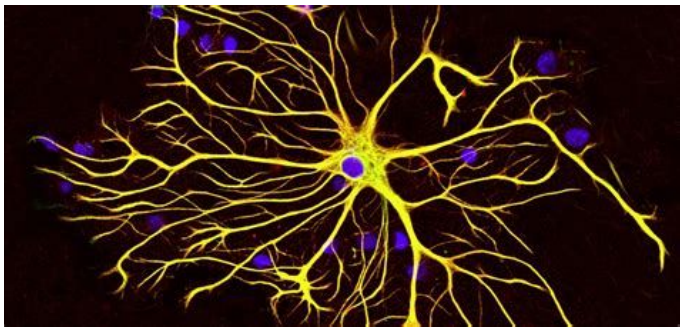


Luxusautó fényképe

Az idegsejtek viselkedését ugyan elsősorban, gyorsan és jól láthatóan a rájuk érkező szinapszisok aktivitása befolyásolja, de működésük számos elemét **a környezetükből származó finomabb, lassabban ható, térben és időben kevésbé pontosan meghatározott jelek is befolyásolják.** Gondolatmenetünk szempontjából **két dolgot** kell megemlítsünk. Egyrészt, hogy **az idegrendszert nem csak idegsejtek, hanem a velük megegyező számban jelen levő gliasejtek is alkotják**, melyek az idegsejtek működését támogatják és hangolják. Másrészt, hogy **az idegsejtek egymással és a gliasejtekkel számos különböző módon hatnak kölcsön,** mely kölcsönhatások eredményeként befolyásolják egymás működését.

Az idegsejtek dadusai a gliasejtek

Mik azok a **gliasejtek**? Olyan sejtek melyek **az idegszövetben találhatók, körülveszik az idegsejteket, és azok működését támogatják, befolyásolják**. A glia szó latin eredetű és ragasztót jelent, mivel akik először felfedezték ezeket a nem-idegsejt idegrendszeri sejteket (ugye az idegrendszer nem csak az agyból és gerincvelőből, hanem a testben futó idegekből is áll) azt gondolták ezek a sejtek tartják össze az idegszövetet. Az elmúlt évtized eredményei alapján egyértelmű, hogy a gliasejtek **meghatározóak az idegsejtek és az idegrendszer működésében**. Alapvető szerepet játszanak **az idegrendszer fejlődésében**, fenntartásában, a szinapszisok **tanulási folyamataiban,** ingerlékenyek, jeleket továbbítanak és **fontosak az agyat ért sérülések és betegségek elleni küzdelemben**. Kóros működésük fejlődési rendellenességekhez és neurodegeneratív betegségekhez vezet.
A következő fejezetben a gliasejtek kialakulásával és fejlődésével folytatjuk.



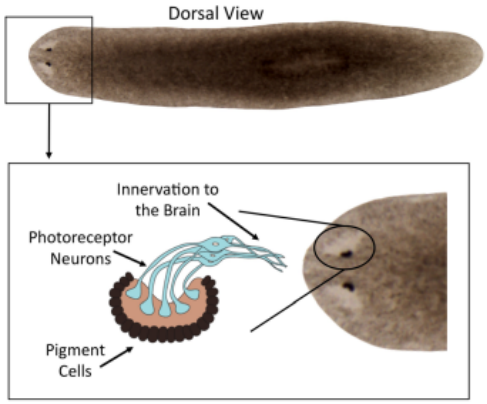
Asztrogliasejt fluoreszcens mikroszkópban készített fényképe. A kék foltok idegsejtek és más gliasejtek magjait mutatják. A sej nyúlványrendszere sárga.

Szerző: **Gulyás Attila**

Dadusok és bestiák: A gliák kialakulása és fejlődése

Ahogy az evolúció során az idegsejtek elkezdtek idegrendszerbe tömörülni, az idegrendszerről „kiderült", hogy az állandósággal kapcsolatban komoly elvárásai vannak. Ugyanis, az idegrendszer a sejtek állapotában kódolja az információt és a kapcsolatokban a funkciót, valamint a tudást, a memóriát.

Azaz, míg átlagos testi sejtjeink lecserélhetők, sem idegsejtjeink, sem nyúlványrendszerük nem. Ráadásul az idegsejteknek a membránpotenciál fenntartásához nagyon sok energiára van szükségük, és a jelintegrálás feladata is igen végletes sajátosságokat követel meg (szinapszisok, ingerületátvitel, terjedés). Amikor a sejtek kommunikációs rendszereiről beszéltünk, akkor megjegyeztük, hogy egy sejt nem tud egyszerre nagyon sok féle dolgot igazán hatékonyan csinálni, mert a génszabályozás és a sejteken belüli jelrendszerek kapacitása véges. Mindezért, amikor az erősen „szakosodott" idegsejtek elkezdtek kialakulni, elveszítették (vagy nem csináltak túl jól) alapvető életfenntartási funkciókat, mint például az anyagcsere vagy a sejtosztódás képességét. Az idegsejtek azért vesztették el osztódási képességeiket, mert a sejtosztódás M fázisában (amikor a mitózis, a kromoszómák szétválása zajlik) a sejtműködés alaptörvényei szerint a sejtnek be kell húznia összes nyúlványát, mert az egész sejtváz (citoszkeleton) újra kell hogy szerveződjön. Ez ugye, egy szinapszisokat alkotó idegsejt esetében elképzelhetetlen, hiszen kapcsolataiban rejlik lényege.

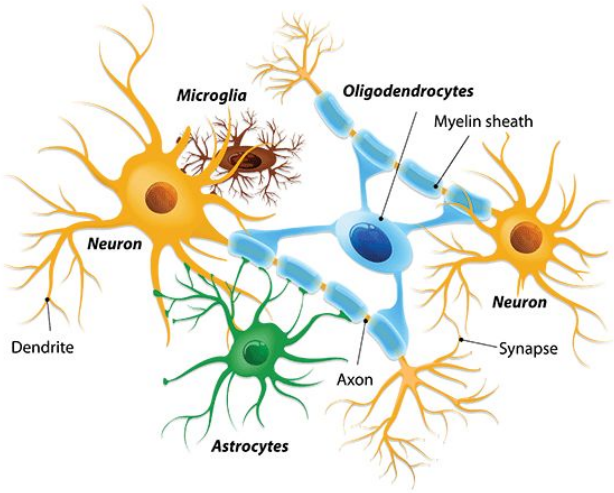


Felül egy örvényféreg látható, mely az első elkülönült érzékszervekkel rendelkező állat. Alul a feji rész kinagyítva a szemekkel. Bal oldalt a szem rajza látható. A kék fényérzékelő idegsejtek a világosbarnával jelölt gliasejtek veszik körül.

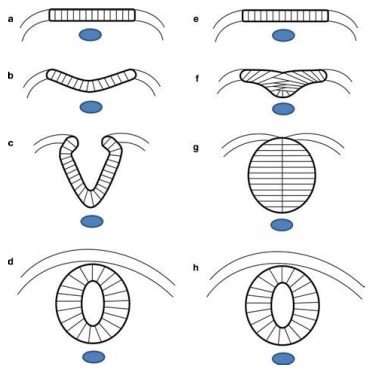
Az idegsejteknek tehát szükségük volt működésüket, túlélésüket támogató sejtekre. Ezért az idegrendszer bonyolódásával a hámsejtekből nemcsak idegsejtek, hanem az őket támogató, kiegészítő funkciójú gliasejtek is kialakultak. Az első gliasejtek egyszerű állatok (laposférgek) érzékelő idegsejtjeinek támogatójaként jelentek meg az érzékszervekben, de hamarosan a gliasejteknél is megjelent a munkamegosztás. Vannak olyan gliasejtek (progenitor), amelyek osztódással további osztódó, illetve specializált, idegsejtekhez kapcsolódó funkciójú, már nem osztódó gliasejteket hoznak létre, amelyek bonyolult nyúlványrendszerrel kapcsolódnak majd az idegsejtekhez, hogy működésüket támogassák. Bizonyos gliasejtek őssejtek is lehetnek, mert nem csak további gliasejteket, hanem idegsejteket is képesek létrehozni. Az őssejtek esete kicsit olyan, mint amikor a Mátrixban a békés járókelő hirtelen Smith ügynökké válik és akcióba lép. A megfelelő jel hatására, az addigi üldögélő, semmit nem csinálók személyiségüket, egy aktív a feladat megoldására hatékony személyiséggé változtatják.

De mit is csinálnak a gliasejtek? Attól függ melyik típusuk és mikor. Itt most csak az emlősök gliasejtjeiről beszélünk majd, azok közül is csak az agyban található gliasejtekről. Azért szűkítek, mert történetünk szempontjából nem fontos, hogy végigsétáljunk újra a törzsfejlődésen és a gliasejtek őseinek összes viselt dolgát bemutassuk.
Kezdjük az elején. A megtermékenyített petesejt elkezd osztódni és kialakítja az egyre több sejtből álló zigótát, mely sok, kinézetre egyforma, és kb. ugyanazokkal a tulajdonságokkal

rendelkező sejtekből áll. Eljön azonban az a pillanat, amikor a zigótán megjelenik egy hosszanti árok, amely velőcsővé fűződik le. Ez az a pillanat amikor az eljövendő állatka szervezete elkezd kialakulni. Az eddig egyforma sejtek elkezdenek szakosodni, specializálódni. Kialakul az idegrendszer kezdeménye, a gerinc kezdeménye, az ivarszervek és a bél kezdeményei, melyek saját egyedi sejttípusokkal rendelkeznek.



Az idegsejteket gondozó 3 gliasejt-típus rajza. Zöld a tápláló asztrocita, kék az axont szigetelő oligodenrocita és barna a rendre vigyázó mikroglia.



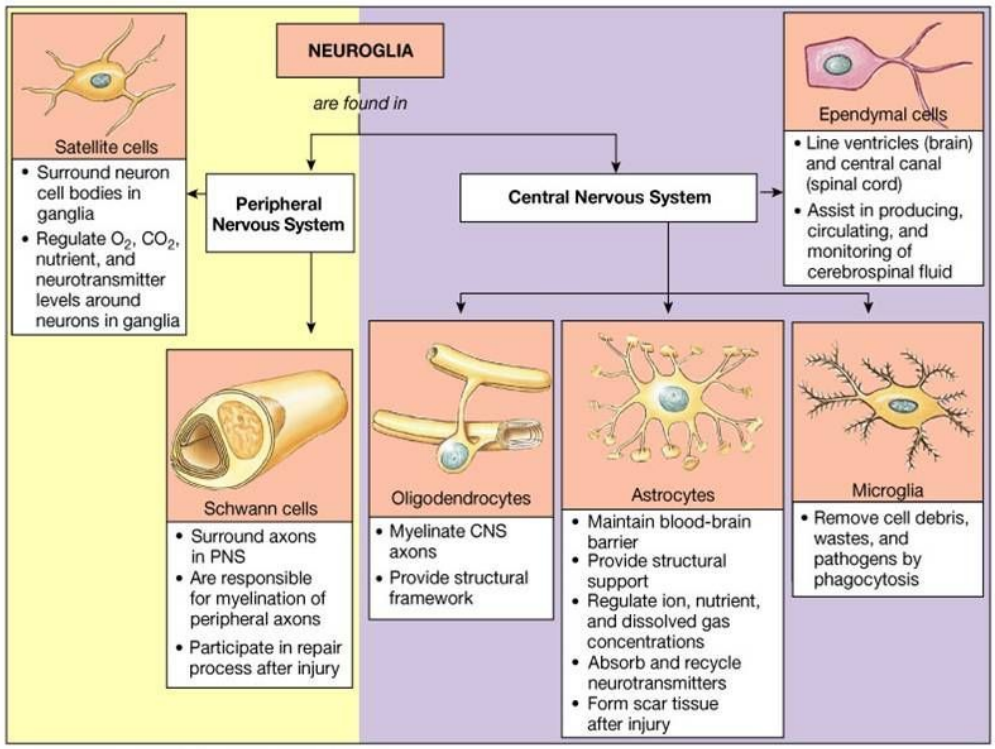
A velőcső lefűződésének lépési. A folyamat végére kialakul egy egy sejtrétegű cső. Ennek a falát fogják a kialakuló radiális gliasejtek vastagítani és az idegrendszert kialakítani.

Az idegrendszert megalapozó velőcső, mint a neve is mondja egy cső. Van fala és ürege. Az első specializálódott sejtek, melyek a velőcső belső és külső felszínét kötik össze egymással a radiális gliasejtek. Ők az idegrendszer központosodásának idején a tüskésbőrűekben és lándzsahalakban jelentek meg. A radiális latinul sugár-irányút jelent, ez utal arra, hogy ezek a sejtek a velőcső felszínére merőlegesen nyúlnak meg, a középponttól kifelé. Ahogy a velőcső fala idegrendszerré vastagodik, a radiális gliasejtek egyre jobban megnyúlnak és folyamatosan osztódnak. Valami olyasmit kell elképzelni, mint egy biciklikerék, ahol a radiális gliasejtek a küllők, melyek a kerékagyat (a közepén lévő tengely lyuka a velőcső belseje) az abronccsal (az agy felszínével) kötik össze. Csak ők nem húznak, hanem nyomnak. Egy idő után a radiális gliasejtek úgy osztódnak, hogy egyik leánysejtjük megmarad radiális gliasejtnek, másikukból pedig különböző idegrendszeri sejteket kialakító progenitor (előd) sejtek lesznek.

Ők hozzák létre további osztódással fajtájuktól függően az idegsejteket, illetve a gliasejtek két típusát az asztrocitákat (szinonimájuk: asztroglia sejtek) és az oligodendrocitákat (oligodendroglia sejtek). Valahol olyat képzeljünk el, mint amikor egy kis csoport hajótörött egy lakatlan szigetre vetődik. Először mindenki mindent csinál a túlélés érdekében, de ahogy családot alapítanak és gyerekeik születnek lassan kialakul egy kis társadalom, amiben egyesek halásznak, mások házakat építenek, gyerekeket nevelnek vagy tanítanak, szakosodnak, specializálódnak. Mindenki azt csinálja, amihez legjobban ért és kölcsönösen segítik egymást.

A gliák közül a radiális gliák ahhoz értenek a legjobban, hogy felépítsék az idegrendszer vázát (ők az ácsok) és azt benépesítsék. Mire az agy kialakul, a radiális gliasejtek majdnem mind eltűnnek, csak néhány, a felnőtt agyban is új idegsejtekkel gyarapodó területen maradnak meg. Az idegsejtek ahhoz értenek, hogy kapcsolatba lépjenek egymással, ingereket vezessenek, jeleket összegezzenek. De ők már se osztódni, se tápanyagot előállítani nem tudnak. Etetni és védeni kell őket.

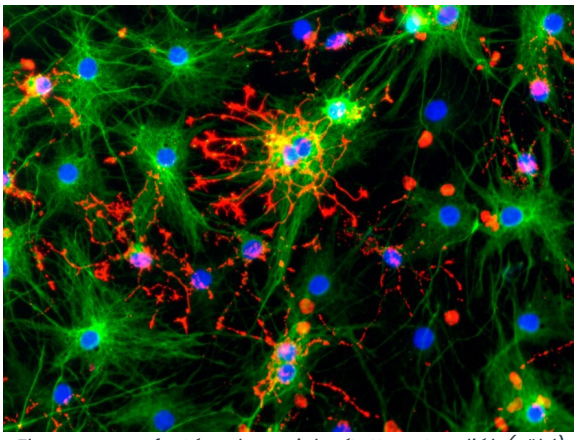




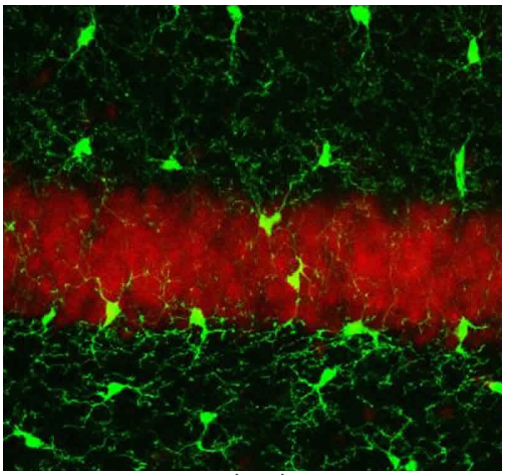
A gliasejtek típusai és szerepe a környéki (bal oldalt) és a központi (jobb oldalt) idegrendszerben.

Az asztrogliák (nevüket az aster, csillag szóból kapták), mivel nyúlványrendszerük mint egy csillag sugarai, a középen elhelyezkedő sejttestből sugárzik kifelé. Az idegsejtek sejttestének és dendritjeinek táplálásában és a szinapszisok babusgatásában fontosak, az agyi gliasejtek felét teszik ki. Az ember asztrogliasejtjei nagyobbak és bonyolultabb elágazásrendszerűek (100-400 µm átmérőjűek), mint az egyszerűbb emlősökben, 10x annyi nyúlványukkal, 15x akkora teret töltenek ki. Hosszú nyúlványokat küldenek a kéreg rétegei, felszíne és a fehérállomány között. Az oligodenrogliák -nevüket az oligo, alig és dendros, fa szóból kapták, mivel viszonylag kevés faágszerű nyúlványuk van – az idegsejtek axonjainak növekedését segítik, a gyors jelterjedéshez szükséges szigetelést, a mielin hüvelyt alkotják, és táplálják az axonokat. Akkor jelentek meg az evolúcióban amikor a gyors ingerületvezetésre képes idegsejtek kialakultak (az őszájúakban, meglepő módon a csigákban 😊, az újszájúakban: a cápákban). Ezt a két glia típust makrogliának (makro=nagy) hívják és azért kell őket elkülöníteni, mert az idegrendszer fejlődése során az

ácsok és óvónénik mellett megjelenik még a rendőrség is, a mikroglia sejtek (mikro=apró) formájában. Róluk eddig nem volt szó, mivel nem hám eredetűek és nem a velőcsőből fejlődnek. Azért rendőrök, mert az immunrendszer részét képezik és mint ahogy a vérsejtek (vörös és fehér) a középső csíralemezből, ők is a mezodermából származnak. Ők a szervezetünk kórokozóit bekebelező nagy-zabálók, a makrofágok (makro=nagy, fagos=enni) rokonai. A már félkész idegrendszerbe a saját lábukon sétálnak be a szikzacskóból, mert hogy amőba-szerűen képesek mozogni, átfurakodni az érfalakon és beszuszakolni magukat az idegsejtek és más gliasejtek közé. A mikrogliák feladata, hogy rendet tartsanak az



Fluoreszcens festéssel megjelenített asztrogliák (zöld) és oligodendrogliák (piros), melyek idegsejteket vesznek körül. Itt az idegsejtek nem látszanak, csak a kék festéket felhalmozó sejtmagjaik. Míg az asztroglia sejtek kisugárzó nyúlványokat alkotnak, az oligodendrocita sejtek ágainak vége ellaposodik, hogy az idegsejt axonokat mielin hüvellyel tekerje körbe.



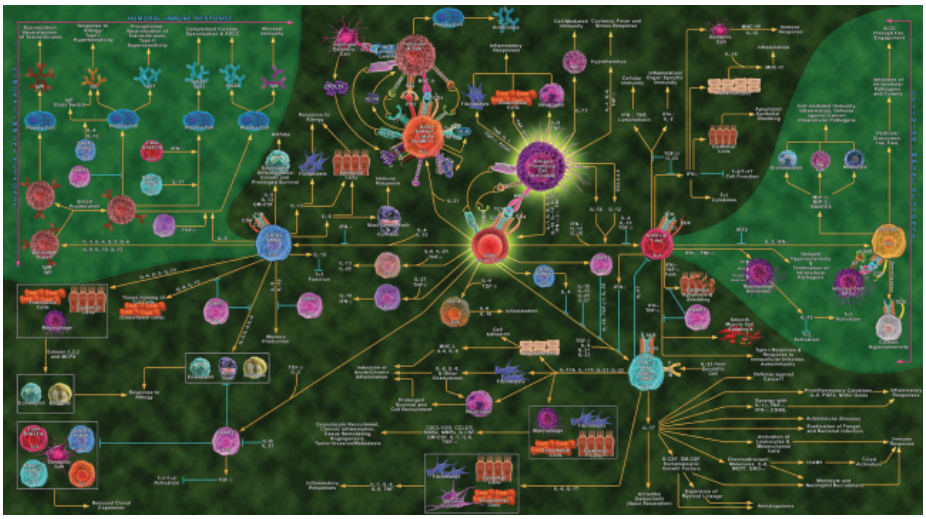
Mikroglia sejtek (zöld) láthatók amint egyenletesen kitöltik az idegszövetet. Pirossal jelöltek a hippokampusz nevű agyterületen egy rétegbe tömörült idegsejtek sejttestei. A sejtek dendritrendszere (nem festett) felfelé és lefelé nyúlik.

agyban, sérülés vagy fertőzés esetén védjék az idegsejteket. Ezt nagyon óvatosan kell csinálniuk, hiszen a sejtek közötti kapcsolatok érinthetetlenek! Nem véletlen, hogy nem is engedi be az agy az izomagyú makrofág fickókat, akik vírusok és baktériumok felfalására vannak szerződtetve, mert nincs meg a képesítésük az intelligens rendrakáshoz. Ezzel inkább a képzett mikrogliát bízza meg. A mikrogliák a piócától az emberig igen hasonlóak, ugyanazokat a hírközlő molekula rendszereket használják, a gliasejtek 10%-át teszik ki.

Szerző: **Gulyás Attila**

Dadusok és bestiák: A vér-agy gát és az agyi immunrendszer.

Ez az a pont, ahol az agy és az immunrendszer bonyolult kapcsolatát be kell mutatni. A két rendszer a test két legösszetettebb hálózatát alkotja. Az emlősök evolúciója során az idegrendszer és az immunrendszer felépítésében szerepet játszó gének száma nőtt meg a legjobban. Rengeteg sejtfelszíni fehérje jelent meg, mely a sejtek azonosításában, egymásra találásában, összekapcsolódásában és jelátadásában játszanak szerepet.



Az immunrendszer sejttípusainak kölcsönhatásait bemutató ábra. Itt a nyilak a sejtek között áramló jelzőmolekulákat és az időlegesen összekapcsolódó sejtek kommunikációját jelzik. Az idegsejtek kapcsolataival ellentétben ezek a kapcsolatok időlegesek.

Mind az immunrendszer mind az idegrendszer sejtjei bonyolult kölcsönhatási hálózatot építenek ki egymás között, de mint alant majd látjuk a két rendszer is beszélget egymással. A különbség az, hogy az idegrendszerben viszonylag kevés típusú sejt van, az információt a közöttük levő kapcsolatok mintázata tárolja. Ha két idegsejt megtalálta egymást és kapcsolatot alakított ki akkor az a kapcsolat megmarad. Ezzel szemben az immunrendszer sejtjei állandó áramlásban vannak, hiszen a sejteknek a test minden zugában járőrözniük kell, hogy a kórokozókat és a daganatsejteket leküzdjék. Az információ abban tárolódik, hogy amikor két meghatározott típusú immunsejt találkozik akkor befolyásolják egymás működését, ami tartósan megváltozik, a sejtek egyedi tulajdonságokat vesznek fel. Vannak sejtek, akik felderítik a kórokozókat, vannak akik emlékeznek rájuk, vannak akik ellenanyagokat termelnek, vannak akik megtámadják a kórokozókat, vannak akik megölik a beteg sejteket és van sok olyan sejttípus ami a többi sejt kölcsönhatását és viselkedését irányítja. Az immunrendszer sejtjei tehát mindenhol ott vannak, mindenbe beleütik az orrukat és ha kell vágnak, szúrnak, rombolnak, ez a dolguk. Az idegrendszernek ezzel szemben állandóságra, nyugalomra van szüksége.

Ennek feloldására az agyi erek fala egyedi módon megvastagodott, egy plusz réteg jól záró sejt az úgynevezett vér-agy gátat alkotja, mely megakadályozza, hogy kórokozók és káros anyagok jussanak be a vérkeringésből az agyba, illetve megvédi az agyat az immunrendszer randalírozásától. De cserébe számos problémát is okoz. Először is nehezebben jut át az oxigén és a tápanyag a vérből az agyszövetbe. Ez sajnos a gyógyszereket is érinti. Számos hatékonynak ígérkező gyógyszer ott bukott el, hogy nem jutott át a vér-agy gáton. A második gond, hogy az erős fal miatt az agynak gyengécske az immunrendszere. Nem csoda, hogy sajnos a legtöbb áttételt képző daganatos megbetegedés végső fázisa, hogy az immunrendszer elől menekülő daganatos sejtek az agyban telepednek meg és a beteg életét kioltó agydaganatként jelentkeznek. Az agyi immunrendszert a fejlődés alatt betelepedett mikroglia sejtek képviselik, de ők egyrészt óvatos duhajok, másrészt nem kapják meg a híreket az immunrendszer felkészült sejtjeitől, hogy kit és hogyan kell megtámadni.

Többen kérdezték, ezért beszúrom a választ ide:

A véragygát embrionális korban már nagyon korán, a terhesség 8. hetétől kezd kialakulni.

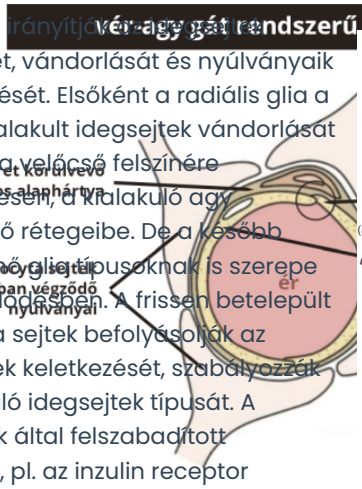
A funkcionális zártság viszont a második-harmadik trimeszterre (20–24. hét körül) éri el a jól működő állapotot. Teljes érettségét valószínűleg a születés körül vagy közvetlenül utána éri el. Újszülöttekben a BBB még [illegible] zárt, mint felnőttekben — ez például magyarázhatja, miért hajlamosabbak bizonyos fertőzésekre (pl. agyhártyagyulladás).



Szerző: **Gulyás Attila**

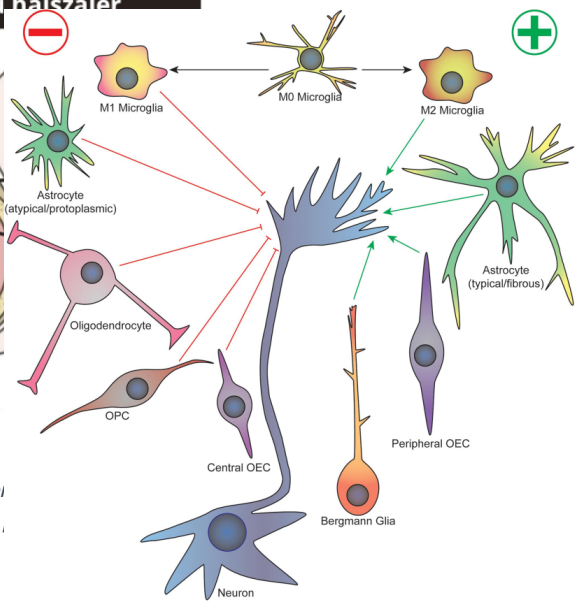
Dadusok és bestiák: A gliák funkciója

Láttuk tehát, hogy az idegrendszer bonyolódása során a neuronok mellett megjelentek a különböző típusú gliasejtek, mivel szükség volt a versenyző igényű idegsejtek támogatására. De mik is azok a feladatok, amelyeket a gliasejtek ellátnak.



A vér-agy gát szerkezete. A kéken futó er[illegible] agyi ér[illegible] szoros kapcsolódó [illegible] ki.

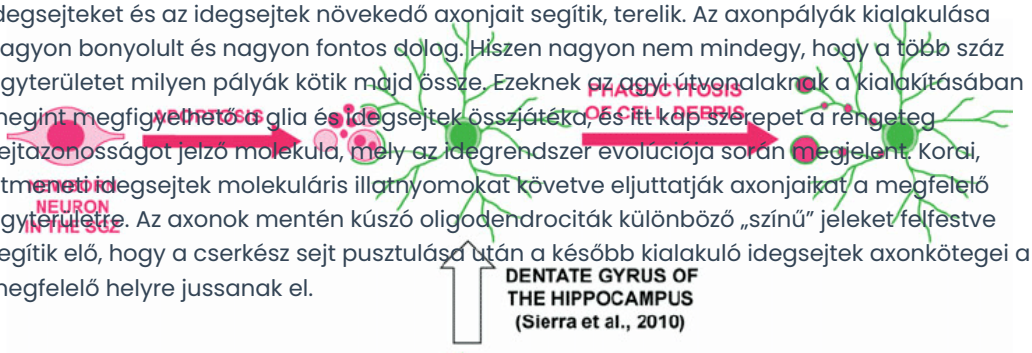
Először is irányítják a neuronok fejlődését, vándorlását és nyúlványaik növekedését. Elsőként a radiális glia a belőle kialakult idegsejtek vándorlását irányítja a velőcső felszínére merőlegesen, a kialakuló agy megfelelő rétegeibe. De a később megjelenő gliatípusoknak is szerepe van a fejlődésben. A frissen betelepült mikroglia sejtek befolyásolják az idegsejtek keletkezését, szabályozzák a kialakuló idegsejtek típusát. A gliasejtek által felszabadított anyagok, pl. az inzulin receptor bekapcsolása útján szabályozzák az idegsejtek növekedését. Az idegrendszer kialakulása során nem csak sejtszaporodás, hanem tervezett sejtpusztulás is van. Bizonyos sejteknek, miután betöltötték szerepüket el kell pusztulniuk. Ezt a folyamatot programozott sejthalálnak, apoptózisnak hívják és a mikrogliának van benne szerepe. Egyrészt jelzi a sejteknek, hogy fejezzék be munkájukat és pusztuljanak el, másrészt részt vesznek a romok eltakarításában. De, amikor ilyen jeleket ad ki, ugyanakkor serkenti a neuronális progenitor sejtek kialakulását, hogy szükség esetén készen álljon a tartalék. Ugye, egy ház építkezésén ott vannak azok is, akik lebontják az állványzatot és elhordják a sittet, hogy a villanyszerelők és burkolók felvonulhassanak a kőművesek után.



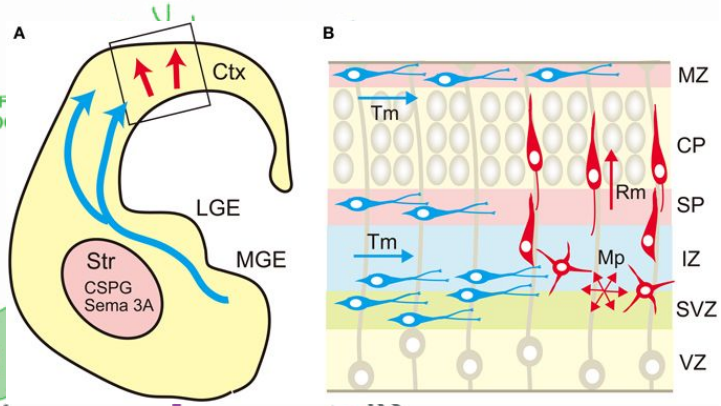
A különböző típusú gliasejtek gátló (piros) és serkentő (zöld) hatásai az idegsejtek növekvő axonjára

A gliasejtek hibás viselkedése felelős lehet a mikro- és makro-cepháliában, azaz a normálisnál kisebb és nagyobb agyméret kialakulásában (lásd Zika vírus). De gliasejteket érintő változásokat figyeltek meg autizmusban is.
Az agy vázának felépítése és az idegsejtek kialakulása után a fejlődés következő fázisában egyes idegsejteknek az agy más területeire kell vándorolniuk, illetve axonjaikkal más területeket kell elérniük. Itt elsősorban az asztrocitáknak és az oligodenrocitáknak van, kissé eltérő szerepe. Az asztrociták inkább a macskákra hasonlítanak, ott maradnak, ahol születtek, azaz nem nagyon mozognak az agyban. A helyben lévő idegsejtek denritág-rendszerének stabilizálásában játszanak szerepet. Az oligodendrociták inkább olyanok, mint a kutyák és farkasok, ha kell messzire vándorolnak, mozgékonyak. Ők a vándorló

idegsejteket és az idegsejtek növekedő axonjait segítik, terelik. Az axonpályák kialakulása nagyon bonyolult és nagyon fontos dolog. Hiszen nagyon nem mindegy, hogy a több száz agyterületet milyen pályák kötik majd össze. Ezeknek az agyi útvonalaknak a kialakításában megint megfigyelhető a glia és idegsejtek összjátéka, és itt kap szerepet a rengeteg sejtazonosságot jelző molekula, mely az idegrendszer evolúciója során megjelent. Korai, átmeneti idegsejtek molekuláris illatnyomokat követve eljuttatják axonjaikat a megfelelő agyterületre. Az axonok mentén kúszó oligodendrociták különböző „színű" jeleket felfestve segítik elő, hogy a cserkész sejt pusztulása után a később kialakuló idegsejtek axonkötegei a megfelelő helyre jussanak el.



Említettük korábban, hogy az agykéregben alapvetően kétféle idegsejt található: a sejtek 80-90%-át alkotó serkentő sejtek és a maradékot adó gátlósejtek. Érdekes különbség figyelhető meg a két sejttípus kialakulásában és vándorlásában. A velőcsőből kialakuló agyhólyagok falának nagy részén kialakulnak a serkentő sejtek és a radiális glia mentén a rájuk jellemző rétegekbe vándorolnak, vertikális (függőleges) irányba. Azért hívják ezt az irányt függőlegesnek, mert az agyhártyákkal borított agyfelszín és a szürke állomány (a sejteket tartalmazó rétegek) alján található fehérállomány (a sejtrétegek alatt futó axonkötegek állománya) közötti irányt jelöli ki. Ezzel szemben, a gátlósejtek csak az agyhólyag két körülhatárolt területén keletkeznek és az oligodendrociták segítségével messzire vándorolva benépesítik a serkentő sejtek által felépített területeket, hogy működésüket szabályozzák. Mozgásuk iránya horizontális, vízszintes, mivel a függőlegesre merőlegesen, oldalirányba az agyfelszínnel és a fehérállomány felszínével párhuzamosan mozdulnak el. A tény, hogy a gátlósejtek más agyterületről vándorolnak az agyfejlődés során később a serkentő sejtek közé arra utal, hogy később, evolúciós barkácsolás útján kezdtek el beépülni a serkentő sejtek közé, hogy azok működését szabályozzák (erről majd írunk a hálózatokról szóló második részben).



A serkentő és gátló neuronok vándorlása az agykéreg kialakulása során. Bal oldalt a fejlődő agy keresztmetszete. Kék nyilak mutatják a hosszú útvonalat, amin keresztül a ganglionik eminence-ben keletkezett a távoli agykéregbe vándorolnak. A serkentő sejtek az agyhólyag falának alján keletkeznek és csak rövid utat tesznek meg (piros nyilak). Jobboldalt a fejlődő agykéreg rajza. A gátlósejtek (kék) horizontálisan, oldal irányba vándorolnak nagy távolságra az oligodendrociták irányításával. A serkentő sejtek radiálisan, függőleges irányba mozdulnak el a radiális gliák mentén.



A mikrogliasejtek szerepe az idegrendszer fejlődése (felső rész) és sérülése (alsó rész) esetén. A zölddel jelölt mikrogliáknak sérülés esetén két szerepe van az idegsejtek (piros) sorsának eldöntésében. Vagy regenerálódásukat támogató anyagokat (kék pöttyök, neurotróp faktorok) szabadítanak fel és segítik a sejtek felépülését, vagy az idegsejtek leépülését okozó anyagokkal (piros pöttyök, neurotoxikus faktorok) jelzik számukra, hogy pusztuljanak el. Az utóbbi esetben részt vesznek a sejtmaradványok eltávolításában.

A gliasejtek második funkciója az idegsejtek táplálása és az idegsejtek megfelelő környezetének (elsősorban ionkoncentráció) biztosítása. Itt legfontosabbak az asztroglia sejtek, akik nyúlványrendszerükkel körül veszik az idegsejteket. A nyúlványrendszer egyes ágai talpszerűen, az agyi hajszálerek (kapillárisok) falához tapadnak. A gliasejt nyúlványrendszere elősegíti a tápanyagok és ionok áramlását a vérkeringés, az idegsejtek és a sejtközötti tér között. A sejtek közötti kapcsolatok útján hálózatba kapcsolódó asztrogliasejtek felosztják egymás közt a teret, mindenki egy térrész ellátásáért felelős.
De mit is tartanak rendben? Először is ellátják az idegsejteket glükózzal, egy egyszerű cukormolekulával és rövid szénláncú zsírsavakkal, mint tejsav és ecetsav. Ezek az egyszerű molekulák azonnal be tudnak lépni az idegsejtek anyagcseréjébe és gyorsan adnak energiát. A sejtek energiaellátása nagyon pontosan kell kapcsolódjon működési szintjükhöz, mivel nem tudnak tápanyagot raktározni. Az asztrogliasejtek érzékelik a cukor, CO2 és O2 mennyiségét. Ha egy területen az idegsejtek aktivitása megnő, a gliasejt hálózatban is

megváltozik a membránpotenciál, Ca2+ szint növekedés halad rajtuk végig hullámszerűen. A gliákból származó jelek hatására az agyi kapillárisok kitágulnak, és megnő az agyszövet helyi vérátáramlása. Így az asztrogliasejtek több tápanyagot tudjanak felvenni a vérből és az idegsejtekhez szállítani. Ezt a megnövekedett vérátáramlást (mely az idegi aktivitás növekedését jelzi) tudjuk a modern képalkotó módszerekkel (PET és MRI) érzékelni és az agy aktivitását működése során megfigyelni.



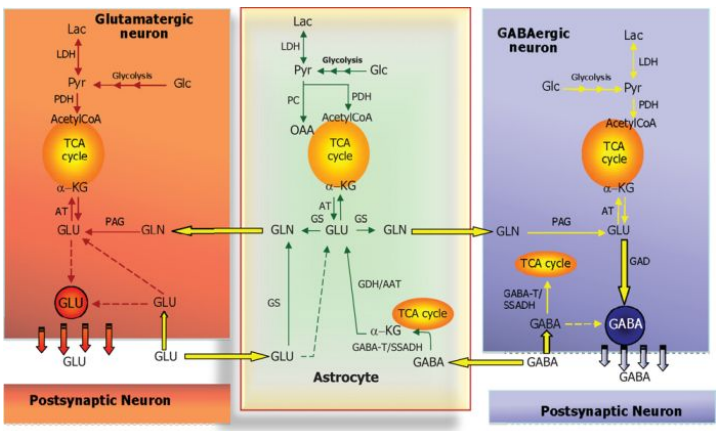
Az asztroglia két funkciójának: táplálás (jobbra) és ingerület átvivő anyag (balra) visszatáplálás ábrája. A gliasejt tejsavval táplálja az idegsejtet, annak axonját és dendritjét. Ugyanakkor a szinaptikus résből eltávolítja a GABA-t és a glutamátot, maja azt inaktív formában, glutaminként adja vissza.

Harmadszor: az idegsejtek membránpotenciálja, mely működésük alapja, erősen függ a sejten belüli és a sejtközötti tér Na+, K+, és kisebb mértékben Ca2+ koncentrációjától. Amikor az idegsejtek működése megnő, a sejtközötti (extracelluláris) térben jelentős mennyiségű K+ halmozódik fel. Ennek eltávolítása fontos, mivel egy sejtből felszabaduló K+ számos szomszédos sejt membránpotenciálját és ezáltal működését befolyásolja, ami nem mindig jó dolog. Ezért az asztrogliasejtek egyik elsődleges feladata az extracelluláris térben felhalmozódó K+ ionok felvétele és ha kell vérbe szállítása. De hasonló szerepet töltenek be a Na+ és Cl- ionok koncentrációjának tartásában is, bár ezek kevésbé problematikusak. Az asztrogliának az agyfolyadék keringésének irányításában és karbantartásában is jelentős szerepe van. Különösen alvás alatt vesz részt az idegsejtekből felszabaduló anyagok eltakarításában. Ezek közül legfontosabb az adenozin, mely az idegsejtekből ürülő transzmitterekkel együtt szabadul fel és felhalmozódása álmosságot vált ki.

A gliasejtek negyedik funkciójában, az idegsejt axonok pátyolgatásában az oligodenroglia sejtek a legfontosabbak. Ők irányítják az axonok növekedését, alakítják ki rajtuk a mielin hüvelyt (a jelvezetést meggyorsító szigetelést) és táplálják az axonokat. Nélkülük a gyors, helytakarékos (sok axon egy kötegben) ingerülettovábbítás lehetetlen lenne, mivel 100 szorosára gyorsítják az axonokon a jelek vezetését és lehetővé teszi, hogy azok átmérője jóval 1 mikrométer alatt legyen.

Az utolsó fiziológiás, azaz egészséges funkció, amiben az asztrociták és a mikrogliák közösen vesznek részt, az a szinapszisok működésének és számának szabályozása. Az asztrogliasejtek az axonterminálissal és a posztszinaptikus dendrittel egy egységet alkotnak. Pontosan szabályozzák a szinaptikus rés ionkoncentrációját és részt vesznek az ingerületátvivő anyagok szinaptikus résből való eltávolításában és az axonterminálisokba való visszajuttatásában.

A gyors eltávolításra azért van szükség, mert különben a szinaptikus áramok elhúzódnak és a gyors, pontos jelátvitel lehetetlenné válik. Mind a serkentő sejtekből felszabaduló glutamátot, mind a gátló sejtekből felszabaduló GABA-t felveszik a finom asztroglia nyúlványok és glutaminná alakítják. Ebben az idegingerületet nem okozó formában juttatják vissza az axonterminálisokba, ahol azok a sejtre jellemző átvivő anyaggá, glutamáttá vagy GABA-vá alakulnak vissza. Mivel az asztroglia sejtek hálózata érzékeli a sejtek aktivitását és ennek függvényében képes a szinaptikus jelátvitel hatékonyságát befolyásolni, egy biztonsági hálózatot is alkot az agyban.



Az asztrogliasejtek szerepe a serkentő és gátló ingerületátvitelben.

A gliák három fázisban is szabályozzák a szinapszisok számát: kialakulás, fenntartás és eltávolítás. Az asztrocitákból számos, szinapszis fejlődéshez szükséges anyag szabadul fel. A mikroglia is szerepet játszik, körülveszi a szinapszisokat és részt vesz a serkentő sejtek szinapszisokat fogadó tüskéinek kialakításában. De fontos a fejlődés során a felesleges szinapszisok eltávolításában. Mivel a mikroglia az immunrendszer tagja, ezért a szinapszisok eltávolításában az immunrendszer jelző molekuláit használja. Az eltávolítandó szinapszisok „egyél meg" jeleket magukra akasztva toborozzák a mikrogliákat.
Autizmusban azt találták, hogy a szinapszisok fenntartásában fontos idegsejt-glia kommunikációban van gond. Hasonló rosszul elhelyezett jeleket figyeltek meg egyéb leépüléssel járó betegségekben: skizofréniában, Huntington kórban és multiple szklerózisban.
A gliasejteknek a kóros (patológiás) eseményekben is fontos szerepe van. Némely differenciálódott gliasejt képes sérülés esetén őssejtté vagy progenitor sejtté válni és új idegsejteket létrehozni. Eltérő típusú kórós események más típusú glia reakciókat váltanak ki. A mikroglia mind fertőzésre, mind sérülésre beindul. Sérülésre gyorsan elkezdenek mozogni, de nem nagyon fagocitálnak (esznek meg) mint ahogyan a makrofágok. Kifinomult, jól képzett titkos ügynökök, akik nem tesznek kárt az agy finom szövetében. Az asztrogliák csak ott reagálnak, ahol a vér-agy gát megsérül, hegeket képeznek a sérülések és sajnos az agyműködést vizsgáló elektródák körül. Az asztrogliasejtek részt vesznek az ionkoncentráció visszaállításában és a mikrogliákkal együtt a sejttörmelékek lebontásában. Ha valami zavar támad működésükben, bajokat is okozhatnak. Ha rosszul irányítják az idegsejtek nyúlványainak növekedését, azok rossz helyre nőnek vagy nem kötnek össze fontos területeket és így szerepet játszhatnak az autizmus, ADHD és a skizofrénia kialakulásában, mely betegségek, úgy tűnik a megfelelő agyterületek hibás kapcsolódása miatt alakulnak ki. Ezekről a betegségekről feltételezik, hogy magzati vagy fiatalkori vírusfertőzéseket követő mikroglia aktiválódás és hibás idegsejtfejlődés következményei lehetnek. A szervezet krónikus gyulladásai során felszabaduló anyagok (pl. interleukin) ugyanis az agyban is kifejtik hatásukat. Ennek evolúciós haszna az, hogy aki beteg, az ne ugráljon! Nem véletlen, hogy fertőzések esetén álmosak vagyunk és leginkább nem akarunk semmit sem csinálni. Viszont a hosszan tartó gyulladás hatása már nem jó. Manapság úgy gondolják, hogy például a depresszió is lehet egy ilyen folyamat eredménye. A szerotonin és a depresszió közötti összefüggés régóta ismert és a gyógyszeres terápiák is a szerotonin szint változtatását okozzák. Kiderült, hogy a mikrogliasejtek érzékenyek a szerotoninra és az befolyásolja viselkedésüket. Egyre több jel utal arra, hogy lehet nem is az idegsejtek, hanem a mikrogliasejtek felelősek a depresszió kialakulásáért. Szerény véleményem szerint, az igazság mindig középen van, szóval maradjunk mindkettőnél. Civilizációs betegségeink, a cukorbetegség és az elhízás is krónikus gyulladást okoz és gyakran depresszióval társul. A COVID által kiváltott idegrendszeri tünetek is eredhetnek onnan, hogy a vírusfertőzés által okozott gyulladásban aktivált mikrogliák megváltoztatják az idegsejtek működését.
Végezetül, az agyat ért traumák, mint például a sztroke esetében is fontosak a mikrogliák. Védő szerepük van. Kísérleti modellekben, ha eltávolítják a mikroglia sejteket a stroke kétszer akkora területet érint.

Mit írt az elektrubadúr a gliasejtekről?

Ez a bejegyzés egy átkötés az #agyséta és egy elinduló új rovat, a #AI között. Kezdjük egy AI által írt verssel, mely a gliasejtekről szól:

A tudat mélyén, kezdődik a misztikus tánc,
Neuronok és glia egyesül, belül kötelékbe font.
A nehéz metál erejével elmesélem ezt a történetet,
Rejtett titkokat felfedve, ahogy legyőzik és diadalmaskodnak.

A neuronok mennydörögnek, mint a mennydörgés,
Az agy követei, üzenetek, hatalmas és korlátlan.
Hálózatok kereszteződnek, összefogva az erőben,
Információkat közvetítenek, repülő emlékeket szülnek.

Hááát. Olyan amilyen. Azért Stanislaw Lem Kiberiádájában a versíró számítógép, az Elektrubadúr versei Murányi Beatrix fordításában sokkal jobbak :)



Az OpenAI logója

Az elmúlt hónapokban mindenki az LLM-ekről beszél. Mármint, hogy a Large Language Models, a Nagy Nyelvi Modellekről, elsősorban az OpenAI cég által fejlesztett ChatGPT, mindenki által elérhető 3.0-ás változatáról.


A Sárkányfű árus

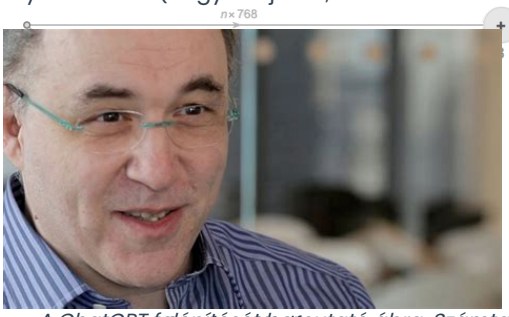
Betört a köztudatba, megjelentek a ChatGPT szerencselovagok, akik mint a Sárkányfű Árus a Süsü a sárkány című alapműben minden elleni orvosságot kínálnak, megfelelő díjazás ellenében.

A mesterséges intelligencia (AI) újabb hatalmas lépést tett meg a nagy deep-learning hálók alkalmazásával. Sokan már arról beszélnek, hogy az AGI (Artificial General Intelligence), az Általános **Mesterséges** Intelligencia már a küszöbön áll és hamarosan itt a robot apokalipszis. Mivel sok kiemelkedő minőségű podcast érhető el a tudat és az agy kérdésében (sajnos a zömük csak angolul) sok figyelemre méltó beszélgetést hallottam mostanában a témában. Lex Fridman és Sean Carroll podcastjait ajánlanám az angolul jól tudóknak. Lenyűgöző emberekkel beszélgetnek, igen mély kérdésekről. A beszélgetésekből, többek között, sokat meg lehet tudni első kézből a mesterséges intelligencia jelenlegi állásáról, működéséről, lehetőségeiről, valamint problémáiról, veszélyeiről.

Tervezem, hogy a közeljövőben írok arról mit gondolok, mint agykutató olyan kérdésekről mint, hogy: Hol tart az AGI? Kell-e félnünk a Terminátortól? stb.

Most egy könnyed felvezetésként néhány szó és vers a ChatGPT-ről, a ChatGPT-től. Először, mint ahogy Ő maga is bevallja, ha rákérdeznek, a ChatGPT egy nyelvi modell. 13 Terabájtnyi tudással, amit irgalmatlan mennyiségű írott szöveggel való tanítás után halmozott fel. Alapjában véve úgy működik, hogy ha beadunk neki egy szöveget, mely kérdéseket is tartalmazhat, akkor megnézi azt, hogy az általa látott szövegek, amik így kezdődtek hogyan folytatódnának. Visszakeresi a 600 rétegű neuronhálózatából, hogy az eddigiek alapján

melyik az a szó (vagy kifejezés, mert nem feltétlenül szavakban gondolkozik) amelyik a legnagyobb valószínűséggel következik. Ezt kiírja nekünk, majd újra megnézi a beadott és éppen legyártott szöveg alapján mi a valószínű következő folytatás. A fejlesztők beállították, hogy ne a legvalószínűbb folytatást válassza, mert az egy nagyon unalmas, kiszámítható szöveget adna, hanem a legvalószínűbb néhány tucat folytatás közül válasszon. Akit érdekelnek a ChatGPT működésének részletei olvassa el Stephen Wolframnak a ChatGPTről írt magyarázatát. Sajnos csak angolul, bár tapasztalataim szerint a böngészőkbe épített fordítók mostanra már (hála az LLM-eknek :) a magyarral is egész jól boldogulnak.



Stephen Wolfram

A ChatGPT felépítését bemutató ábra. Számtalan többrétegű neuronháló van egy bonyolult hálózatba kötve. Ebben nagyon hasonlít az agykéreg felépítésére, ahol az agykérgi területek bonyolult feldolgozási hálót alkotnak. Nem véletlen, hiszen az AI hosszú jégkorszakának végét a modern neurobiológia eredményeinek beépítése hozta el.

Mindemiatt, amit a ChatGPT-től kapunk az nem feltétlenül igaz (erre fel is hívják belogoláskor a figyelmünket), hanem egy jó körülbelül átlagigazság. Van egy pszichiátriai tünetcsoport. Korsakoff szindrómának hívják. Leggyakrabban idült alkoholistáknál jelentkezik, akiknél az alkohol a magasabb rendű agykérgi területeket már leradírozta. Tudnak beszélni és valamilyen szinten érvelni, de memóriájuk már szétesett és prefrontális kérgükkel a valóságot és a kételkedést már nem feltétlenül dolgozzák bele mondandójukba. Ha megkérdezik őket valamiről, akkor határozott véleményt mondanak, egy hosszan tartó zavaros szöveg formájában, szaknyelven „konfabulálnak". No ez az, aminek nagy mestere a ChatGPT 😊, mint a híres Münchausen báró. Visszakérdeztem, hogy ezt és ezt a tényt honnan szedte. Rezzenéstelen arccal mutatott nekem egy tudományos hivatkozást. Megkértem adja meg a DOI-át azaz az elérhetőségét az interneten. Erre is kaptam választ. Persze amikor megnéztem az adott című cikk az adott évben és adott újságban nem létezett, és a DOI is teljesen máshova mutatott. Kértünk tőle valamit és előállított egy nagy valószínűséggel helyesen kinéző tartalmat, igazságtartalom nélkül. Így működik.



Münchausen báró, amint ágyugolyón utazik

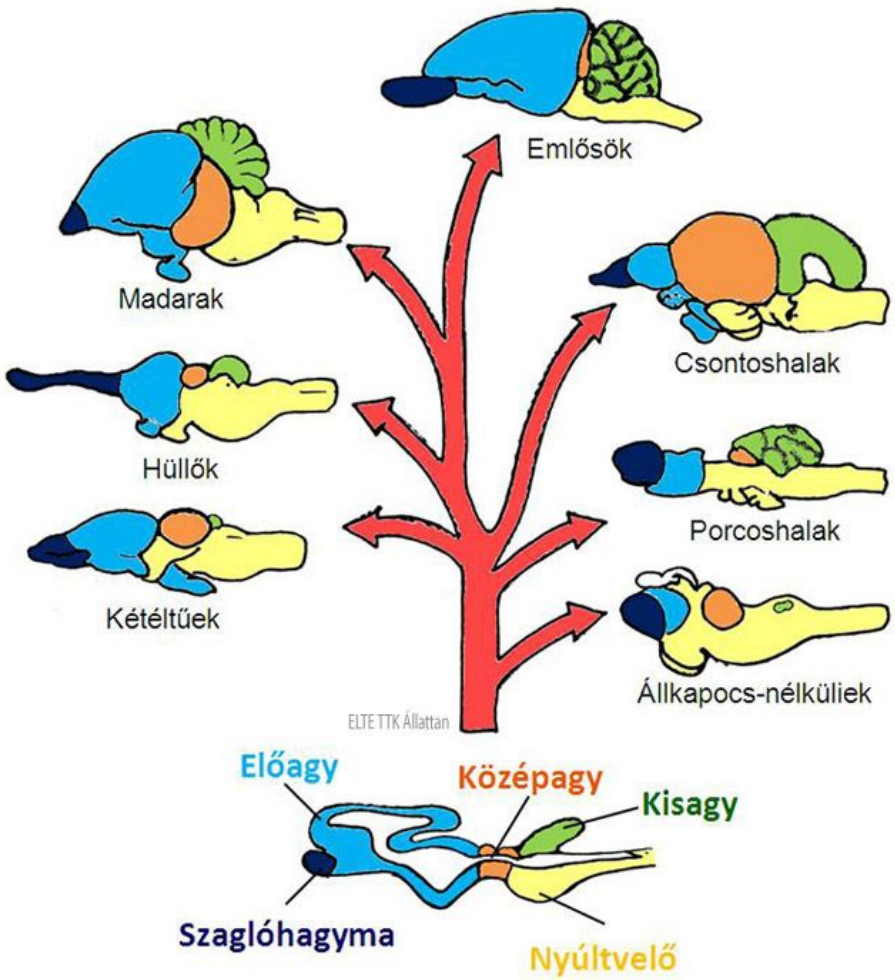
Viszont játszani remekül lehet vele. Kóstolgatni, mit tud. Váratlan kérdésekre mit válaszol? Verset írni például egészen jól tud.
Amikor elkészültem a gliasejtekről szóló anyaggal a ChatGPT-t is megkértem, hogy írjon nekem a gliákról (angolul). Egészen használható anyagot írt, körülbelül egy nem szaklektorált gimnáziumi tankönyv színvonalán. Megkértem, hogy magyarul is tegye meg, majd különböző versformákban. Igen jót szórakoztam. Akit érdekel a párbeszédünk itt megtalálja.

Jó szórakozást!

Szerző: **Gulyás Attila**

Az idegrendszer részeinek evolúciója

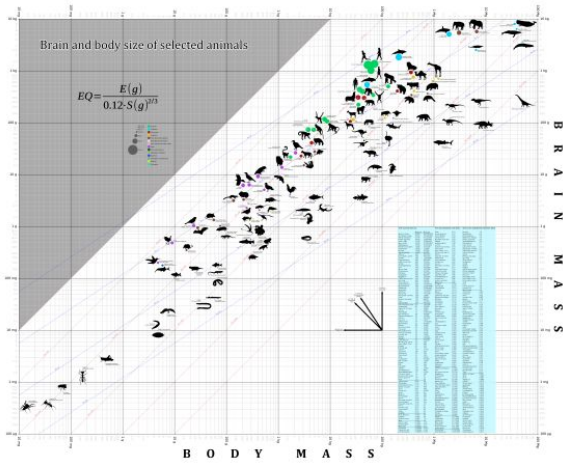
Az #agysétában eddig láttuk, hogyan működnek az egyszerű idegsejtek és milyen kölcsönhatásokba lépnek. Hamarosan utunk második részének vágunk neki, a hálózatok tulajdonságait fogjuk megismerni. De előbb másszunk fel egy közeli sziklára, és egy minisorozatban nagyvonalakban ismerkedjünk meg az előttünk álló tereppel. Hogyan is néz ki egy emlős agy? Milyen részei vannak és ezek hogyan hatnak kölcsön?



A különböző agyterületek fejlődése az evolúció során. Az előagy egyre nagyobb méretűvé (és fontosságúvá) válik.

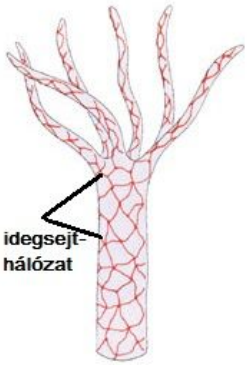
Ha végigsétálunk a törzsfán és megnézzük az állatok anatómiáját azt láthatjuk, hogy a testtömegnek egyre nagyobb százaléka alkotja az idegrendszert, és ezen belül a központi

idegrendszer súlya (mindkét értelemben) is megnő, hiszen mint a Homeosztázisról szóló írásban láttuk, az agynak egyre komolyabb szerepe van a túlélés biztosításában. Ha ide kattintasz a jobboldali ábra betöltődik nagy méretben.



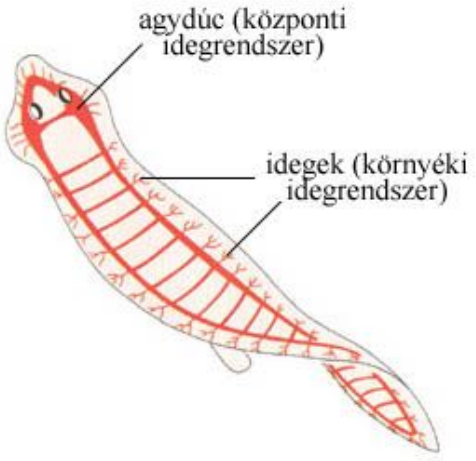
Az agy méretének növekedését bemutató ábra. A kétszeresen logaritmikus skálán látszik, hogy az agy a testméret növekedésével nő. De az is látszik, hogy minél intelligensebb egy állat, annál feljebb található az átlós vonal fölött, hiszen testsúlyához képest (vízszintes tengely) nagyobb az agymérete (függőleges tengely).

A méret növekedéséhez az vezetett, hogy az érzéksejtek és a mozgató sejtek közé egyre több köztes idegsejt: interneuron épül be. De míg az érzékelő sejtek (receptorok) és izmokat beidegző mozgató idegsejtek száma viszonylag szerény mértékben nő, addig a köztes idegsejtek száma elszabadul. Egy örvényféreg szemében 25 fényérzékeny sejt van, az emberében közel százmillió. Ezzel szemben az örvényféreg ötezer idegsejtjével szemben az emberi agy közel százmilliárd idegsejtből áll.
Ez persze nem egy egyszerű mennyiségi növekedés. A beépülő köztes idegsejtek egymást beidegző, eltérő feladatokat megoldó magvakba szerveződnek, többszintű, egymásba ágyazódó hálózatokat alkotva, hogy egyre összetetteb feladatokat legyenek képesek megoldani.



A hidra testét még csak egy egyenletes idegsejthálózat fonja be, nem találhatók benne központok.

A csalánozókban (hidrák, medúzák, korallok) még csak egy egyszerű, egész testet egyenletesen behálózó, központosítatlan idegrendszer található. A különböző férgekben a testen végigfutó dúcláncokba tömörülnek az idegsejtek. A gyöngysorszerűen felfűzött, az egyes területeket irányító magvacskák (nucleus-ok) az állat hossztengelyében információt szállító kapcsolatokkal vannak összekötve. Mivel az állatok feji végén található a szájnyílás és erre halad legtöbbjük, itt tömörülnek a mozgás irányát meghatározó ízlelő, szagló, tapintó és látó érzékszervek. Ezek kiszolgálására a feji végben levő magvak

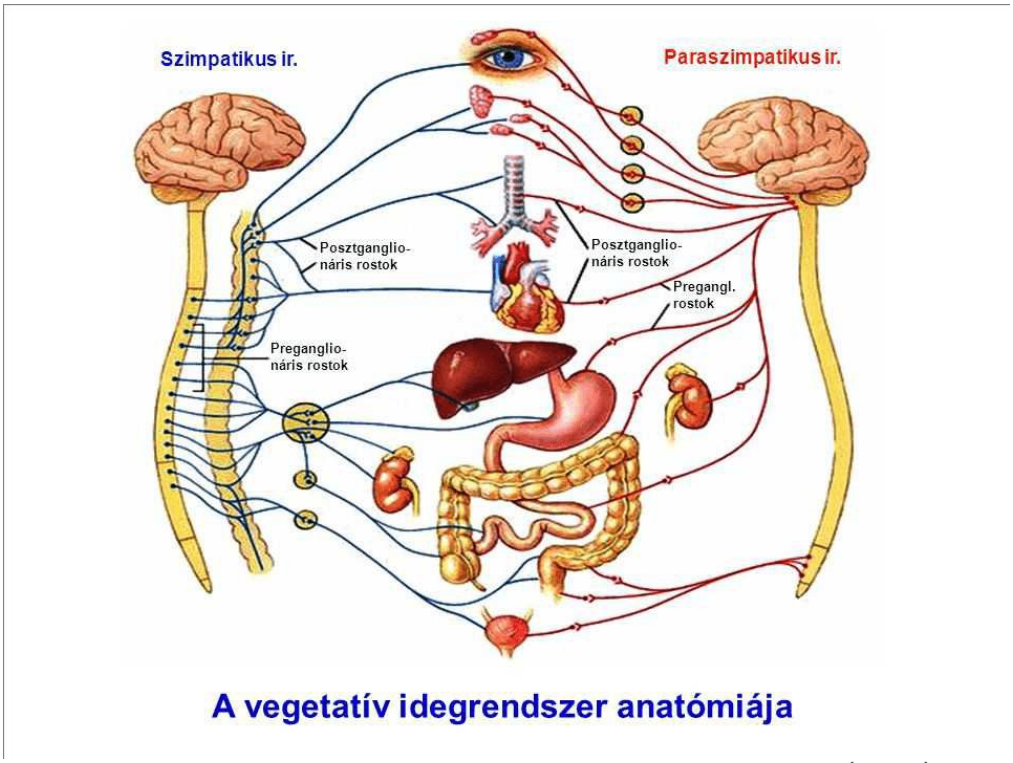


A laposférgektől kezdve, két a testen végigfutó dúclánc alakul ki, mely a feji részen megvastagodik és a két oldal összekapcolódik. Az evolúció későbbi szakaszában a két dúclánc egyetlen lánccá olvad össze. Ebből lesz a

mérete és bonyolultsága elkezdett megnőni. Mire a halakhoz érünk, már határozott, a testen végig futó gerincvelőre és a test elején található agyra válik szét a központi idegrendszer.

gerincesek gerince, illetve az ősszájúak (pl rovarok) hasi dúclánca.

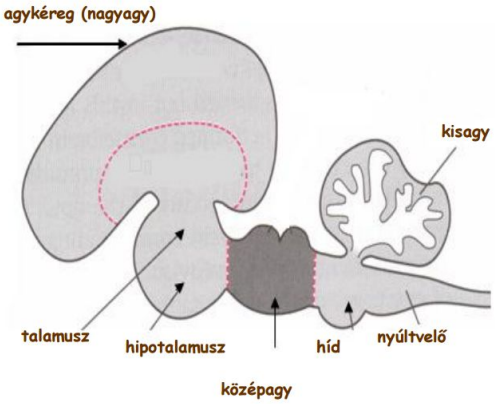
De miért mondjuk, hogy központi idegrendszer? Van másik is? Igen van, a környéki (vagy perifériás) idegrendszer, mely összeköttetésben áll a központi idegrendszerrel, de nem annak védett tokjában a gerinccsatornában és a koponyában található, hanem szétszórva a szervezetben, körülvéve, beidegezve és szabályozva az egyes szerveket. Mindenki ismeri az egyik legnagyobb ilyen központot, aki levegő után kapkodva görnyedt össze, miután rekeszizma magasságában levő solar plexus-át megütötte vagy megütötték. A bélnek saját idegrendszere van például, ami a bélmozgásokat irányítja. Az agykutatás mellett kicsit elhanyagoltak ezek a rendszerek, pedig hihetetlenül fontos szerepet játszanak testünk egészséges működésében. Két alrendszere a szimpatikus és paraszimpatikus idegrendszer



A belső szerveink működését szabályozó vegetatív idegrendszer szimpatikus (stressz) és paraszimpatikus (regenerálás) ágának vázlata.

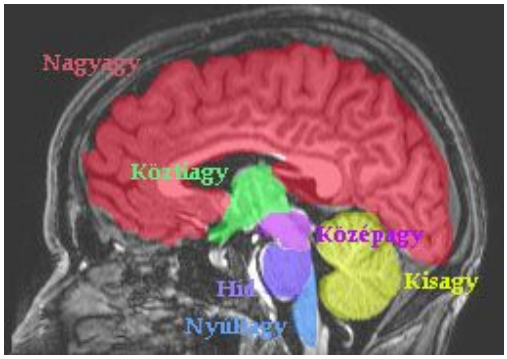
egymással- a mérleg két tányérjához hasonlóan ellentétesen befolyásolja, hogy testünk éppen a flight-or-fight, azaz a menekül-vagy-támad készenléti állapotában van-e, vagy pedig a pihenés-testépítés-gyógyulás állapotában. Nem véletlen, hogy mivel korunk zaklatott, rohanó világában szervezetünk gyakorlatilag egész nap egy feszült állapotban van (a szimpatikus rendszer aktiválódik) és a vér az izmokba, valamint az agyba áramlik, sokunknak komoly stresszbetegségei alakulnak ki. A reflux, magas vérnyomás és keringési betegségek mind annak következményei, hogy a készenléti állapotban nem jut elég vér zsigereinkbe, hogy azok megfelelően végezzék munkájukat és regenerálódjunk.

De térjünk vissza a központi idegrendszerhez, hiszen ezzel van dolgunk.
A gerincesekben az agy három, egymás után elhelyezkedő agyhólyagjából fejlődik az embrió kialakulása során a gerincvelő feji végén az utóagy, középagy és előagy. Ezek relatív mérete eltérően fejlődik ahogy a törzsfán egyre feljebb haladunk. Az előagy egyre nagyobb lesz és kialakítja agyunk legfeltűnőbb és a tudatosságban meghatározó szerepet játszó



A gerinces agy egymást követő agyhólyagjaiból kialakuló agyterületek.

struktúráját a két agyféltekét. Ezek felszínének jelentős részét az agykéreg borítja, alapjuknál pedig az agykéreg számára vagy az agykéreg felől érkező információt szállító és vele szoros kapcsolatban álló talamusz és striátum található. A kéreg agyunk legkésőbb kialakult (mind a törzsfejlődés mint az egyedfejlődés során) és legösszetetteb része. Utazásunk során róla lesz a legtöbb szó. A szintén az előagyhoz tartozó talamusz és a striátum az agykéreg működése szempontjából fontos, visszacsatolt kapcsolatrendszerben áll az azzal, ezért gondolatmenetünk szempontjából (de szerkezetüket tekintve nem) tiszteletbeli agykérgi területnek számítanak. A talamusz és a striátum szerveződéséről majd a harmadik részben beszélünk részletesebben.
Az utó és középagyat, valamint az előagy azon részét mely nem az agykérget alkotja kicsit pongyolán, de funkcionális szempontból elfogadhatóan „kéreg alatti területek” névvel illetjük a továbbiakban.



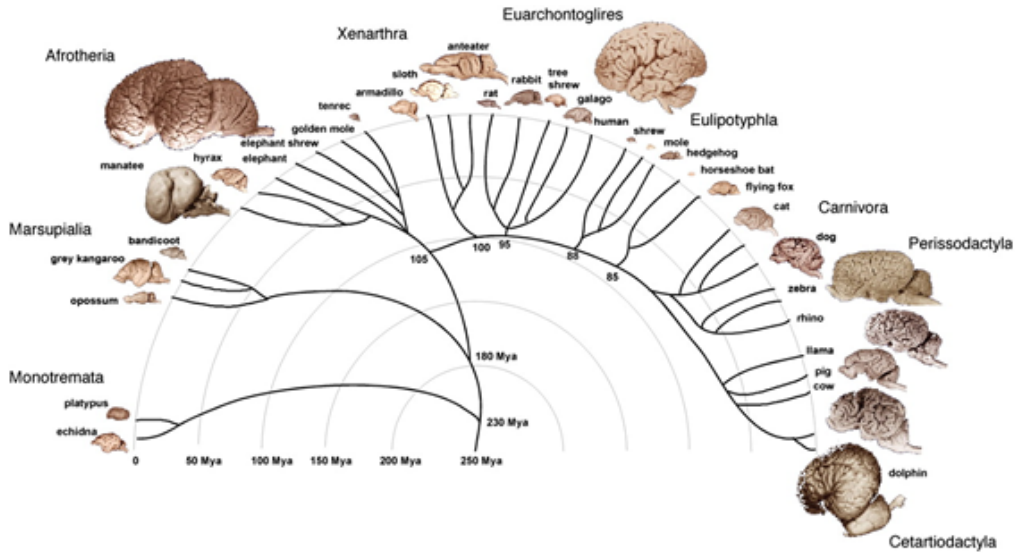
Az emberi agy részei.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agy darabolása: az agykéreg és a kéreg alatti területek funkciója

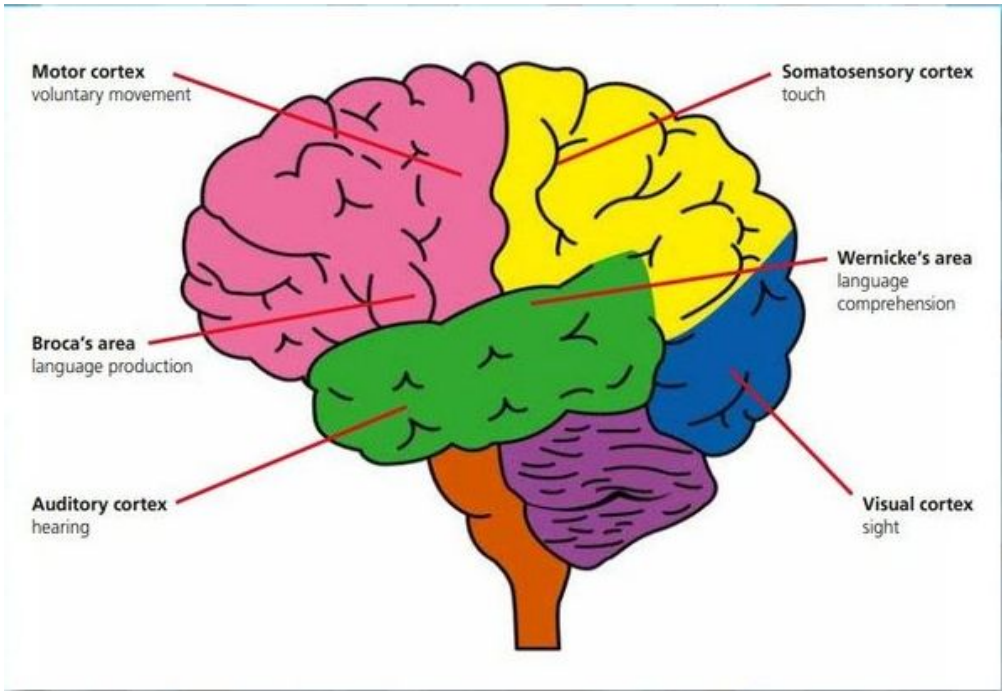
Az agykéreg és a kéreg alatti területek számos vonásukban jelentősen eltérnek egymástól. Először is a kéreg alatti területek ősiek, az idegrendszer evolúciójának korai fázisában megjelennek (540 millió éve) és mivel egy élőlény idegrendszerének elsősorban a túlélés alapvető mechanizmusainak biztosítása - nem pedig Shakespeare műveinek méltányolása - a feladata, alapvető szerepük van az életben maradásban. Ezekben a struktúrákban található a légzés, vérkeringés, testhőmérséklet, víz és ionháztartás, anyagcsere és egyéb alapvető életfunkciók szabályozása. Összefoglalóan, a szervezet homeosztázisáért, belső egyensúlyáért felelősek. Ezen területek sérülésekor a beteg nem kómába esik, hanem nagy valószínűséggel meghal.

Az evolúció során később, kb. 180 millió éve kialakuló agykérgi területek ebből a szempontból kevésbé kritikusak, „nélkülözhetők”, mivel az ő képességük a magasszintű problémamegoldás, emlékezet és tervezés. Ezt a neurobiológiai kutatások korai szakaszában drasztikus kísérletekkel mutatták be. Macskák agyában különböző szinteken vágásokat ejtettek és megfigyelték az állat viselkedését. Ha a vágás a gerincvelő és az utóagy között történt a viselkedés egyszerű volt, az állatt megfulladt, szíve leállt és egyéb gyors módokon elpusztult. Egyre előrébb vágva egyre több alapvető életfunkció maradt meg. Ha az agykéreg és a középagy között vágtak az állat tudott állni, követett egyszerűbb ingereket és még az eléje helyezett táplálékot is elfogadta.

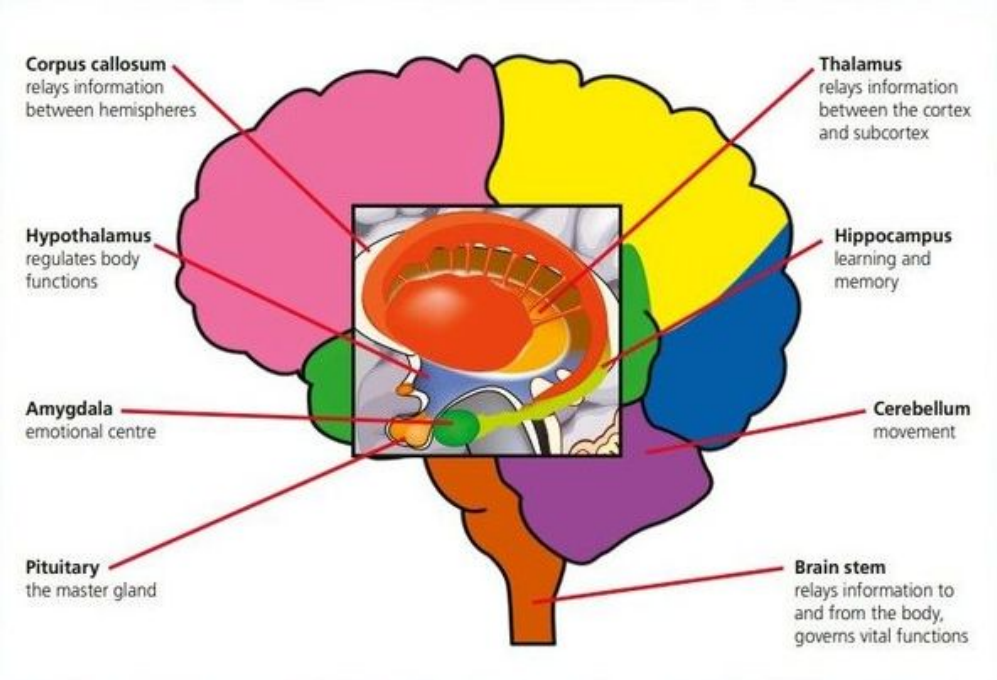


Az emlősök agyának evolúciója és az egyes rokonsági ágak szétválásának időpontjai.

Ezekből a kísérletekből az is kiderült, hogy sok inger reflexszerű feldolgozására és egyszerű, merev, automatikus válaszok végrehajtására a kéreg alatti területek is elegendők. Ez persze nem meglepő, hiszen az alsóbbrendű gerincesekben nagyjából ezek az agyterületek vannak csak meg. Egy hal vagy egy béka igen jól megél mereven programozott ösztöneivel.



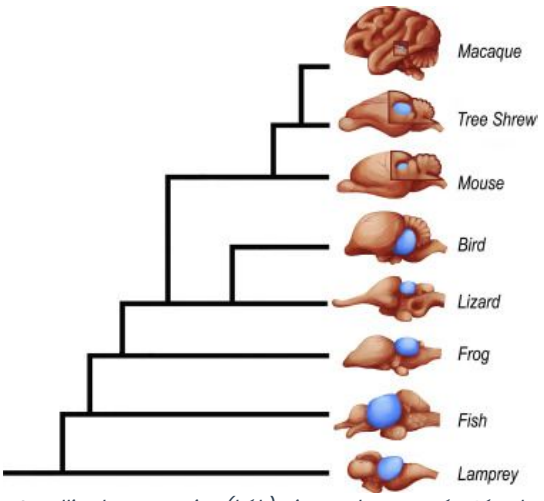
Az agykérgi területek funkciói. Magasszintű látás, hallás, tapintásfeldolgozás, beszéd, döntés, mérlegelés, emlékezés.



A kéreg alatti területek funkciói: ingerátvitel, homeosztatikus funkciók biztosítása (testhőmérséklet, vízháztartás, légzésszabályozás), hormonrendszer szabályozása,érzelmek

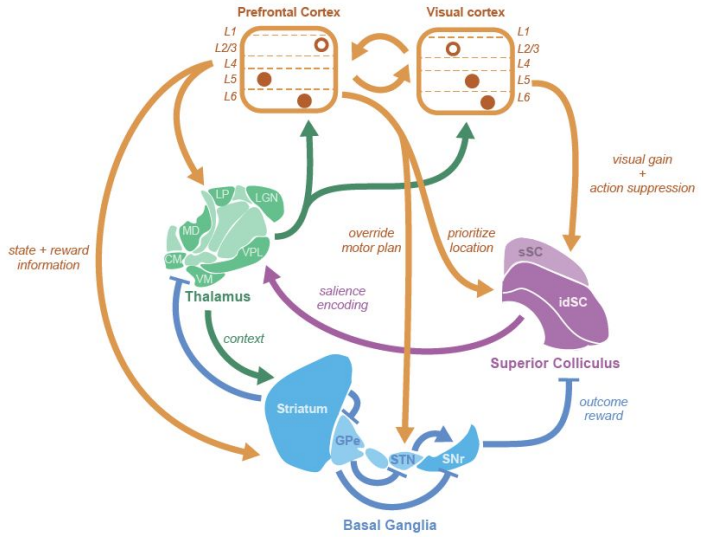
A később kifejlődő magasabb rendű, bonyolultabb felépítésű, tanulásra képes és bonyolultabban összekötött agyterületek ráépültek ezekre az ősi, ösztönös merev válaszokat adó területekre és fokozatosan átvették, pontosabban finomították válaszaikat azáltal, hogy erős lefelé irányuló vetítéseikkel gátolták azok válaszait és kifinomult válaszokkal helyettesítették.

Jó példa erre a colliculus superior (CS, latin jelentése felső dombocska) és a látókéreg viszonya az evolúció során. Halakban, békákban és egyszerűbb hüllőkben, ezt a középagyi struktúrát látólebenynek (tectum opticum) hívják, ott a látásfeldolgozás legfelső központja. Ide érkeznek be elsősorban közvetlenül és közvetve a szemből az idegrostok. A látás és a mozgás összehangolásáért felelős terület. Irányítja a szemmozgásokat és a test orientációját. Amikor egy béka meglát egy legyet, először szemét fixálja rá, majd irányba fordul, végül nyelvével célozva elkapja. Mindhárom fázist a CS irányítja. Emlősökben az előagyban kifejlődnek az agykérgi területek és a látókéreg átveszi a látás feldolgozását. Az egérben a szem idegsejtjei információt küldenek mind az agykéregbe, mind a CS-be, mely azt tovább küldi a látókéregbe. A CS továbbra is fontos a látás és a szemmozgás összehangolásában, de a látókéreg végzi a bonyolultabb látásfeldolgozást.



A colliculus superior (kék) viszonylagos méretének változása a törzsfejlődés során. Egyre kisebb lett, hiszen szerepének egy részét átvette a látókéreg. Az agyak mérete nem azonos skálán van feltüntetve, mindegyik különböző mértékben nagyított.

Nem csak azt deríti ki egy tárgyról, hogy hol van és merre mozog, hanem azt is, hogy



A colliculus superior (lila, jobb oldalt) kapcsolatrendszere az agykéreg különböző területeivel (narancs) és a többi kéreg alatti területtel. Ugyan a tárgyfelismerésben már nincs szerepe, de irányítja a figyelmet, és például az agykéreg rajta keresztül tudja szabályozni hova figyeljünk.

micsoda, mik a tulajdonságai és hogyan kell hozzá viszonyulni. Például az agykéreg akadályozza meg azt, hogy elkapjunk egy felénk dobott üvegcserepet. Ha a CS-en múlna elkapnánk. A CS mellett található a középagyban a colliculus inferior (CI, alsó dombocska). Ez nagyon hasonló dolgokat csinál, csak nem a látó, hanem a hallóinformációt használja fel. Azaz irányítja, hogy a hang felé forduljunk pl. emlősökben a CS és CI szerepe már összeolvad egy kicsit, a CS multimodális. Ez azt jelenti, hogy több érzékszervtől kap információt. Nem csak a látó, hanem a halló és valamelyest a taktilis (érintési) információt is begyűjti, azaz mind hangra mind mozgásra fordítjuk szemünket, fejünket, testünket, de képes a menekülési reakciót is tudattalanul irányítani. Ha egy állványzat alatt állunk és egy nagy robajt hallunk a döntésnek nincs ideje megjárni az agykérget, „gerincvelőből" (pontosabban középagyból) ugrunk azonnal a megfelelő irányba.

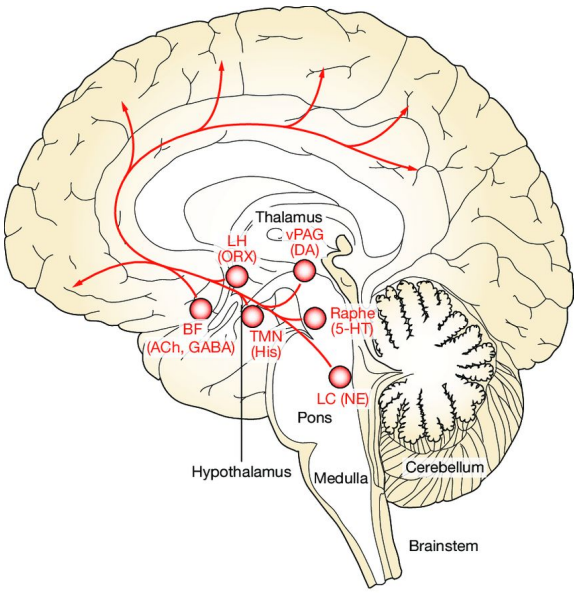
Mikor a macskánál a köztiagy magasságában végezték a vágást, a CS felszabadult az agykéreg irányítása alól és végezte a dolgát, mint a békában. A macska életben maradt, mert amikor elé raktak valamit, a CS arra irányította a figyelmét és mozgását (igaz nem mondta meg neki, hogy az egér, macskatáp, csirkemáj vagy cérnagombolyag). Amikor a táplálék illatát megérezte, az állat egy másik kéreg alatti területe elindított a táplálkozási mozgásokat.

Az evolúció során kialakult két alapvetően eltérő agyterület szerveződéséről a következő részben írunk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Miben tér el az agykéreg a kéreg alatti területektől?

Ha mikroszkóppal vizsgáljuk az agykéreg és a kéreg alatti területek szerkezetét, alapvető különbségeket látni. A kéreg alatti területek számtalan sejtcsoportosulásból, idegi magvakból állnak, melyek a magokra jellemző összetételben tartalmazzák sokféle sejt keverékét, a magra jellemző összeköttetési mintázatban. Az egyes területek sejtjei gyakran egyedi kémiai ingerületátvivő anyagot (transzmitter) vagy azok keverékét használják kommunikációjukban. Ezek egyrésze lassú, más sejtek viselkedését hosszabb távon áthangoló hatású. Némelyikük, mint például a noradrenalin vagy a hisztamin, itt, a központi idegrendszerben szinapszisok útján, mint transzmitter működik, de a szervezetben a vérkeringésbe is felszabaduló hormonként is hat.

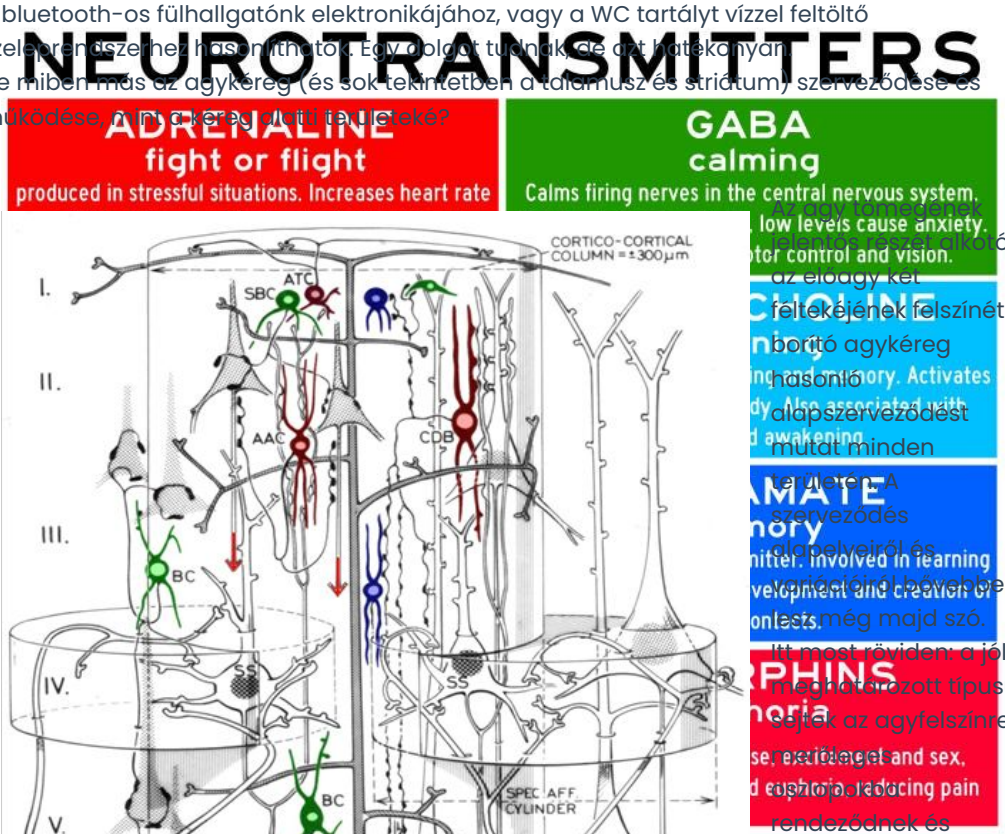


A kéreg alatti területekről felszálló moduláló transzmittereket használó pályák eredete.

Mások, a szerotonin vagy a szomatosztatin pedig a bélidegrendszer fontos ingerületátvivő anyagai (még a hisztamin is). A kéreg alatti területek hasonló transzmittereket tartalmazó magjai diffúz, egymásba fonódó és a szervezet belső egyensúlyának irányításában meghatározó magrendszereket alkotnak.
Az egyes transzmitter rendszerek a szervezet működésének eltérő aspektusainak szabályozásáért felelősek és károsodásuk vezet számos gyakori idegrendszeri megbetegedéshez. Az acetil-kolin tartalmú magrendszer az ébrenlét biztosításában, valamint a tanulás és memória szabályozásában fontos. A rendszer károsodása Alzheimer kórhoz, korai szenilitáshoz vezet. A szerotonin rendszer az alvás-ébrenlét napi ciklusának szabályozásán keresztül a hangulat, emóciók, étvágy és szexuális hajtóerő szabályozásában játszik szerepet. Zavarai az oly sokakat érintő depressziót okozzák. Az adrenalin és noradrenalin az éberség és figyelem szabályozásában, valamint a készenléti állapot létrehozásában fontos. Ennek eltúlzott és krónikus működése a stressz. A hisztamin szintén fontos az ébrenléthez és a készenléthez. A dopamin szerepet játszik a motivációban, mozgásszabályozásban és a tanulás szabályozásában, ő a boldogsághormon. A rendszer egyensúlyának megbomlása figyelhető meg szenvedélybetegeknél, illetve a dopamin tartalmú sejtek pusztulása okozza a Parkinson kórt. Egy viszonylag későn felfedezett rendszer egy orexin nevezetű átvivőanyagot használ és összehangolja az éberséget, ébrenlétet és a szervezet energiaháztartását. Az endorfinok fájdalomcsillapítók, felszabadulásuk eufóriát okoz. Erős fizikai terheléskor szabadulnak fel, hogy ne érezzük a fáradtságot míg menekülni vagy támadni kell. A legerősebb függőséget kiváltó kábítószerek, a mákszármazékok (ópium, heroin, és a Michael Jacksont és még sok százezer amerikait megölő fentanil) ezeknek az anyagoknak a hatását utánozzák. Ártalmatlanabb formája a runners high, a hosszútávfutók futás függősége. Mivel szervezetük hozzászokott a hosszú futások során felszabaduló endorfinokhoz, szükségük van a futásra, hogy igazán jól érezék magukat. Ezek a rendszerek mind idegsejt nyúlvány kapcsolataik, mind a transzmitterek egy részének egymásba alakulása útján összefonódnak és ez vezet a szervezet egyes homeosztatikus funkcióinak összehangolásához.

Mint korábban láttuk, ezek a szabályozó rendszerek az agyfejlődés korai állapotában kialakult területek részei és alapvető életfenntartó szerepük van, emiatt szerkezetük és összeköttetésrendszerük genetikailag meghatározott, csak kisfokú rugalmasságot mutatnak. Az egyes területek egyedi szerkezetű célprocesszorok, egyszerű feladatok merev megvalósítására. Leginkább egy a szobánkban a hőmérsékletet szabályozó termosztáthoz,

a bluetooth-os fülhallgatónk elektronikájához, vagy a WC tartályt vízzel feltöltő szeleprendszerhez hasonlíthatók. Egy dolgot tudnak, de azt hatékonyan. De miben más az agykéreg (és sok tekintetben a talamusz és striátum) szerveződése és működése, mint a kéreg alatti területeké?



működési módiainak

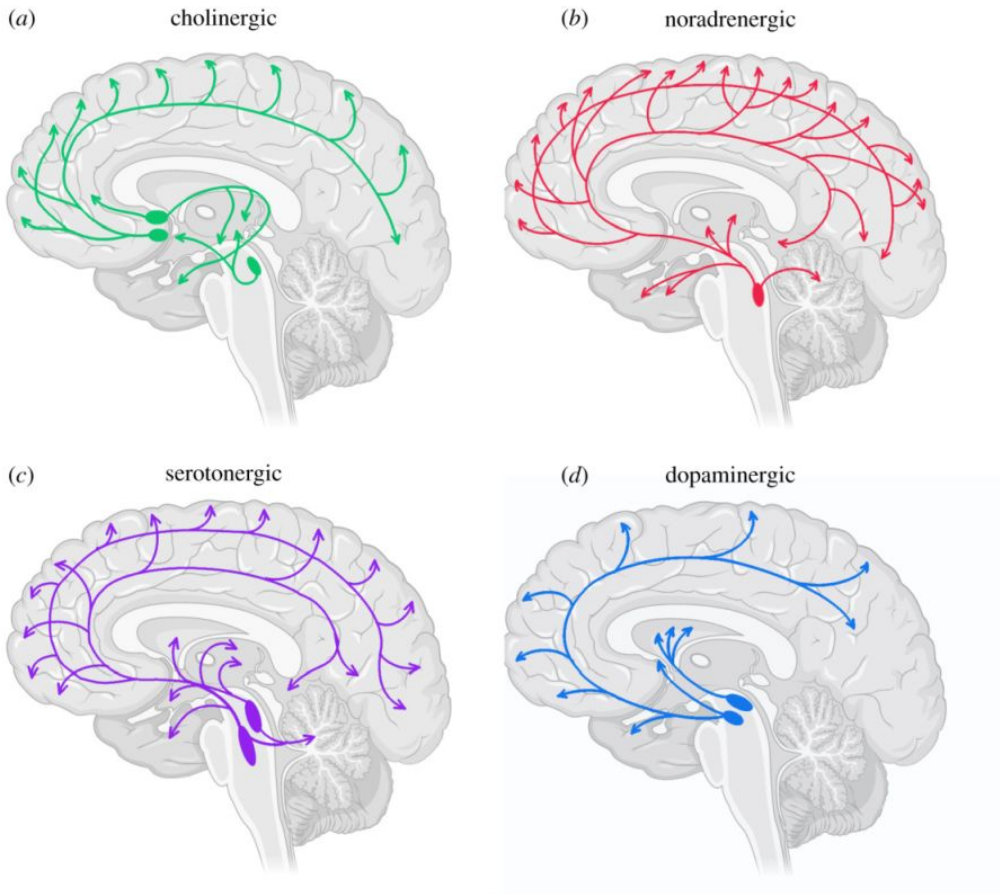
Az agy tömegének jelentős részét alkotó, az előagy két féltekéjének felszínét borító agykéreg hasonló alapszerveződést mutat minden területén. A szerveződés alapelveiről és variációiról bővebben lesz még majd szó. Itt most röviden: a jól meghatározott típusú sejtek az agyfelszínre rendeződnek és hasonló belső kapcsolatrendszerrel leírható ismétlődő agykérgi modulokat alkotnak. A modulok jól meghatározott rétegeibe érkeznek a kéreg alatti területekről, illetve számos más modultól a bemenetek, és ugyanígy jól meghatározott rétegekből erednek a kéreg alatti területek, illetve a más modulok felé menő kimenetek. Az agykéreg leginkább egy nagy irodaépület szerver szobájára hasonít, ahol polcrendszereken szépen elrendezve állnak a hasonló felépítésű router és szerver modulok, amiket jól rendezett kábelkötegek kapcsolnak egymáshoz. A modulokat két, transzmitterként gyors ingerületátvivő hatású aminosavat használó sejttípus építi fel: a más sejtek aktivitását fokozó hatású glutamátot serkentő sejtek és a célsejtek aktivitását csökkentő gamma-amino-vajsavat (GABA) használó gátlósejtek. A modulok felépítése és más modulokhoz való kapcsolatrendszere agyterületenként kissé eltér és ezáltal meghatározza az adott agyterület működését, információ feldolgozó képességét. Az agykéreg legfontosabb vonása, hogy a serkentő sejtek közötti szinapszisok erőssége többféle tanulási

Szentágothai János ábrája egy agykérgi modulról. Ilyen modulok ismétlődnek az agyban milió számra.



Számítógéphálózat központjában elhelyezkedő polckon elhelyezkedő, kábelkötegekkel összekötött kapcsoló egységek (switch-ek).

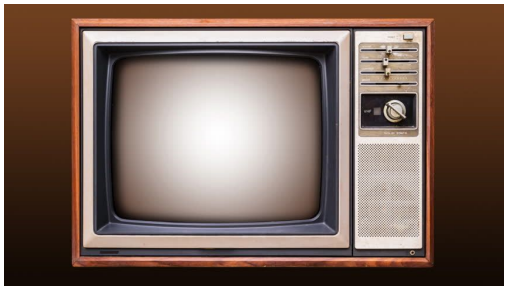
mechanizmus útján tartósan meg tud változni. Ez a tanulás folyamata és így tárolódnak a memórianyomok. A kéreg alatti területek merev, genetikusan meghatározott szerkezetével szemben az agykérgi modulok a tanulás során megszerzett információk segítségével fejlődnek. Ez teszi lehetővé, hogy az agykéreg rugalmasan válaszoljon a környezet kihívásaira és számtalan eltérő típusú feladatot tudjon megoldani. Az agykérget a kéreg alatti területek cél-áramköreivel szemben tekinthetjük egy általános problémamegoldó számítógép központi processzorának (CPU-jának), melyen tetszőleges feladatot megoldó programok futtathatók. Mint az utazás végén látjuk az agykéreg hardware-én fut a tudat software-e.



A főbb agyi felszálló transzmitterpályák lefutása az agykéregben.

Amikor az emlős evolúcióban kialakult az előagy két oldalsó lebenyén az agykéreg, hogy az élőlény bonyolultabb feladatokat legyen képes rugalmasan megoldani, az életfontosságú kéreg alatti rendszerek rajta tartották a „kezüket" az agykéreg működésének irányításán. A kéreg alatti területekről, hosszú felszálló idegpályák indulnak és az egyes magvakra jellemző transzmittereket szabadítanak fel az agykéregben. Vagy közvetlenül szinapszisok útján egy-egy idegsejtre, vagy közvetve a sejtek közötti térbe. Ezeknek a szerepe, hogy az idegsejtek és kapcsolatrendszerük működésének hangolása (modulálása) útján az agy működését a szervezet és a környezet aktuális állapotának megfelelő állapotba kapcsolják. Ne felejtsük, a levegővétel vagy a ránk szakadó állvány előli elugrás az evolúciónak és nekünk is fontosabb, mint Shakespeare szonettjeinek élvezete! Mint azt sokan tapasztalhatják hangulatunk, az éhség, a fáradtság, a fázás, a boldogság vagy egy új dolog által okozott izgatottság erősen meghatározzák hogyan is gondolkodunk és mit cselekszünk. Ilyenkor mindig a kéreg alatti területek hangoló hatását figyelhetjük meg gondolkodásunkra (mely elsősorban az agykéregben történik).

Többek közt ezért nem kell tartanunk a Terminátortól és a mesterséges intelligencia elszabadult gyilkos robotjaitól. Az AI rendszereket mérnökök tervezik, és nem a mostoha fog és karom evolúció során keletkeztek. Ennek megfelelően nincsenek meg bennük a kegyetlen hajtóerők.



Egy klasszikus TV készülék. A jobb felső sarokban találhatók a hang és képminőséget állító csúszka potméterek.

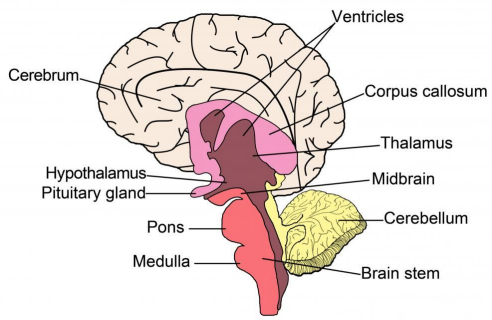
A két egymást kiegészítő agyterület szerepét és információ áramlását egy televízió működéséhez hasonlíthatjuk. A külvilágból kábelen érkezik hatalmas mennyiségű információ, amely megjelenik a képernyőn és a hangszóróban. De a távirányítónkkal, néhány gomb nyomogatásával, kevés információt közölve, jelentősen megváltoztathatjuk a kép fényerejét, kontrasztját és a hang erősségét. Az agykéreg a külvilág ingereit dolgozza fel magas szinten a szervezet mindenkori igényeinek megfelelő módon, mely igényekről kéreg alatti területekről eredő moduláló jelek tájékoztatják.
A két rendszer egy kölcsönösen összekapcsolt hálózatot alkot, mely a szervezet és a külvilág kölcsönhatását vezérli. A későbbiekben majd látni fogjuk, hogy a kéreg alatti rendszerek agykérgi vetítése igen fontos az agykéreg aktivitásának tér és időbeli szervezésében, mely a tudatosság kialakulásához nélkülözhetetlen. A kéreg alatti területek sérülése tudatvesztéshez vezet. De persze ez nem azt jelenti, hogy itt van elrejtve a válasz a nagy kérdésre, hiszen az autót sem a gázpedál hajtja, mégis kell ahhoz, hogy menjen az autó.

Hátra van még agyunk egy fontos része. Erről írunk legközelebb.

Szerző: **Gulyás Attila**

Agyunk PPU-ja a kisagy!

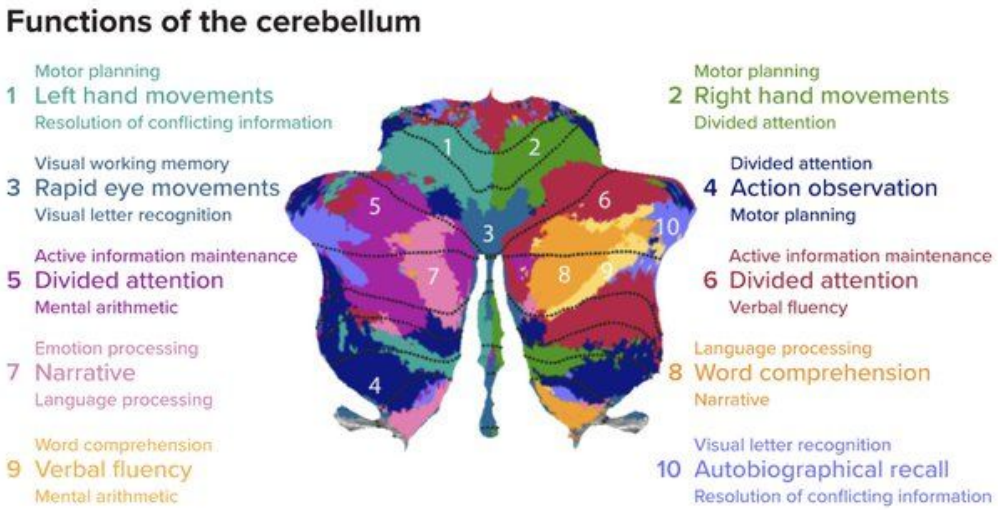
„És mi van a kisaggyal?" - hördül fel az agy anatómiájában járatos olvasó. Valóban, ne feledkezzünk meg erről a sok idegtudós által mellőzött, az agy többi részétől elkülönülő agyterületről sem, bár szigorú értelemben nem érintjük sétánk során, mert a tudatos agyműködés kialakításában csak járulékos (bár fontos) szerepe van.



A kisagy (sárga) az agytörzshöz kapcsolódik, a koponya hátsó felszínén alul található.

A kisagyat sokáig csak a mozgásösszehangolás elemének tartották és ezért nem gondolták, hogy fontos lenne a tudatosság kialakulásában. Ez a nézet onnan ered, hogy a kisagy sérülései legszembetűnőbben a mozgáskivitelezésben (de nem a tervezésen) okoznak zavarokat. A sérültben a mozgás koordinálatlan, szaggatott lesz, a mozgásfázisok időzítése rossz, egyensúlyát veszti, szemmozgásai zavartak. Amikor azonban finomabban megvizsgálták a tüneteket kiderült, hogy nem csak a beszéd képzése zavart, hanem a gondolkodás elemei is: a szavak megértése, a figyelem megosztása, a fejszámolás, betűfelismerés és a

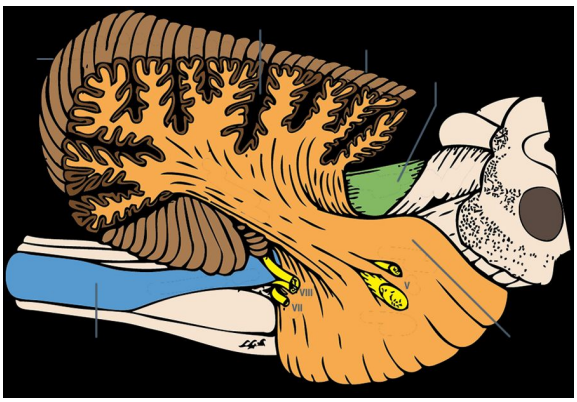
személyes emlékek felidézése is nehézségekbe ütközik.



A kisagyi funkciók kitereített térképe. Az agykéreg pseciális feldolgozó területeivel párhuzamosan a kisagy felszínén is megjelentek támogató területek. Ezek nem csak a mozgástervezésben, hanem számos magasszintű tudatossághoz szüksége feleadat megoldásában részt vesznek: figyelem, nyelvi szerkezet, szómegértés, emlékezet.

A kisagy az emberi agy tömegének 10%-á adja, de az agyban található idegsejteknek több mint a fele található itt. Idegsejthálózatainak viszonylag „egyszerű" kapcsolatrendszerének leírásában Szentágothai Jánosnak meghatározó szerepe volt.

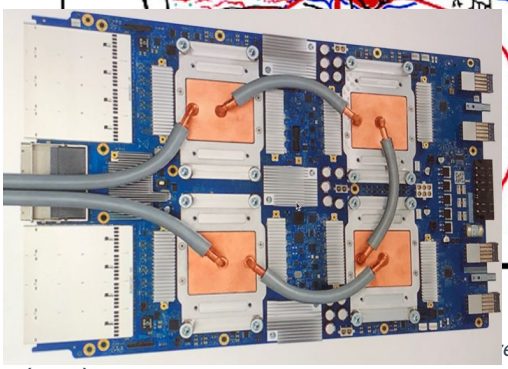
Hasonlóan az agykéreghez, a kisagyban ugyanolyan modulok ismétlődnek milliószor, csak az egyes területek máshonnan kapják bemeneteiket. Az evolúció során a kisagy mérete arányosan követte az agy többi részének fejlődését (kivételt tesz néhány elektromos érzékszervekkel rendelkező hal, ahol a kisagy hatalmas). Az emberben, ahogy az agykéreg hatalmasra nőtt a kisagy is több mint kétszer nagyobb, mint más emlősökben. Figyelemre méltó, hogy ahogy az evolúció során fejlődő agykérgekben egyre bonyolultabb funkciók jelentek meg, ezeket a funkciókat támogató területek párhuzamosan a kisagyban is kialakultak.



Sötét sárga mutatja a hatalmas rostkötegeket melyek útján a kisagy (barna) információt kap és küld a nyúltagyon kerestül az agykéreg és a gerincvelő felé (zöld és kék rostok)..

A kisagy az utóagy tetején ül és hatalmas idegpályákkal kapcsolódik mind a felette található agykéreghez, mind az alatta található gerincvelőhöz. A gerincvelő adatokat szállít számára a test helyzetéről, az izmok és ízületek pozíciójáról, terheléséről, de meghatározó fontosságú információkat kap a középfülben található egyensúlyszervből is. A kisagy az agykéreggel (elsősorban a mozgató területekkel) kölcsönös kapcsolatban áll, átkapcsoló állomásokon keresztül. A mozgásszervezésben szerepe az, hogy az agykéregben (valamint striátum és talamusz) kidolgozott mozgási szándékokat a test aktuális állapotának (végtagok állás, izmok terhelése)

megfelelő izommozgásokká alakítja. Számítógépes hasonlattal élve a kisagy úgy viszonyul az agykéreghez, mint a PPU a CPU-hoz. Mint feljebb írtam a számítógépben a CPU = central processing unit = a processzor képes arra, hogy különféle okos programokat futtasson. Ha azonban egy olyan feladatot kell megoldania, amiben nagyon sok fizikai objektum hat kölcsön egymással, például azt kell kiszámolnia hogyan dől össze egy téglákból álló épület, vagy hogyan kavarognak a folyadékok, a CPU nagyon lassan boldogul, mert ez egy speciális feladat, amit nem tud igazán hatékonyan megoldani. Az elmúlt években már okos telefonjainkban is van PPU, physics processing unit, azaz fizikai processzor, mely képes arra, hogy a fizikai világ jelenségeit igen hatékonyan modellezze. Egy PPU jóval kevesebbet tud, mint egy CPU, csak viszonylag egyszerű, a világ fizikai kölcsönhatásait (impulzus, forgatónyomaték, súrlódás, rugalmas és rugalmatlan ütközés) leíró számításokra képes, de egyszerre több ezer párhuzamosan dolgozó elemi részecskéhez hasonlóan több ezer tárgy kölcsönhatását képesek igen gyorsan számolni. Amikor egy számítógépes játékban összedől egy híd, a CPU a híd elemeinek helyzetét és sorondák a testdarabok irányát megadja a PPUnak, utána mossa kezeit, hátradől, a híd összeomlásának kiszámítása a PPU dolga. A CPU már foglalkozhat mással.



(a) egy grafikus feldolgozó egység kártyája (piros) egy alaplapi foglalatban (zöld).

(b) egy alaplapi foglalat (zöld) egy grafikus feldolgozó egység kártyája (piros) egy alaplapi foglalatban

(c) egy alaplapi foglalat (zöld) egy grafikus feldolgozó egység kártyája (piros) egy alaplapi foglalatban

Egyetlen Purkinje sejt több tízezer rosttól kap bemenetet. Egyetlen rost pedig több ezer Purkinje sejtet idegez be.

Geekeknek: a cikk második olvasására rájöttem, hogy a kisagy nem is igazán a PPU-val, hanem a Google által kifejlesztett speciális hardwarrel, a TPU-val, Tensor Processing Unit-al analóg. Ezeket a mesterséges intelligenciához használt neuronhálózatok futtatására használják és hatalmas mennyiségű, párhuzamos vektor és mátrix művelet elvégzését teszik lehetővé. A kisagyrnak vannak olyan évtizedes [illegible] mintázata alapján feltételezik, hogy az agyi mintázat vektorokban reprezentált mozgási parancsokat a kisagy mátrixműveletek útján alakítja izommozgás parancs vektorokká a test mindenkori helyzetének függvényében.

A kisagy és az agykéreg hasonló módon működik együtt. Az agykéreg azt dolgozza ki, hogy mit és hol akarunk megragadni, hova mozgatni, vagy mi honnan hova akarunk elmozdulni. Egy mozdulatot számtalan módon lehet azonban végrehajtani. Ha szilárdan állunk máshogy nyúlunk valamiért, mint mikor a létra tetején egyensúlyozunk. Egy nehéz dolgot más mozdulattal emelünk meg, mint egy könnyűt. Az eltérő esetekben más izomcsoportokat más időzítésben és más erőkkel mozgatunk. A kisagy szerepe az, hogy miután az agykéregtől megkapta a kivitelezendő mozgást, a test izmaiból, ízületeiből és inaiból, valamint az egyensúly szervből érkező információk alapján kidolgozza azt, hogy az adott pillanatban mely izmokat és hogyan kell használni, hogy biztonságosan végrehajthassuk, amit agykérgünk parancsolt. A kisagy kimenete elsősorban gátló, megvétózza azokat a mozgásokat, amiket testünk aktuális állapotában nem tudna vagy nem lenne biztonságos végrehajtani. Ezt a vétót mindenki megtapasztalhatja, aki tud kerékpározni. Üljön fel a bringájára, induljon el, majd határozza el, hogy elesik. Nem megy, valami



Létrán egyensúlyozó ember. Keményen dolgozik a kisagy.

megakadályozza, valahogy nem akaródzik. A mozgástervezés automatikus részei nem tudatosodnak csak az elhatározás (az se mindig), illetve a kivitelezett mozgás. Mint a negyedik részben majd látjuk a tudatosságba kerülés nagy megtiszteltetés, mert egyszerre csak kevés dologra tudunk figyelni, és az az agy nagyon sok erőforrását lefoglalja. Ezért ami megy magától, tudattalanul az nem is tudatosodik, mert nem kell. A bicikli példa esetében a nem tudatosodó tiltások azok a „valamik" amik megakadályozzák hogy felborítsuk magunkat.



A kisagy legátolja a károsodás esélyével fenyegető mozgásterveket.

Ezzel le is zártuk a túra első részét.

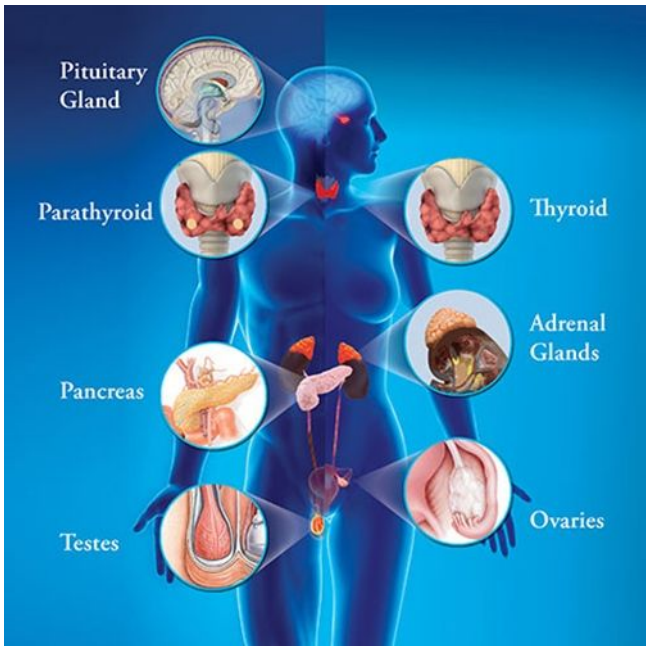
Irány a hálózatok viselkedése!

Szerző: **Gulyás Attila**

Az idegsejtek működésének hangolása I: A jelátvitel szintjei.

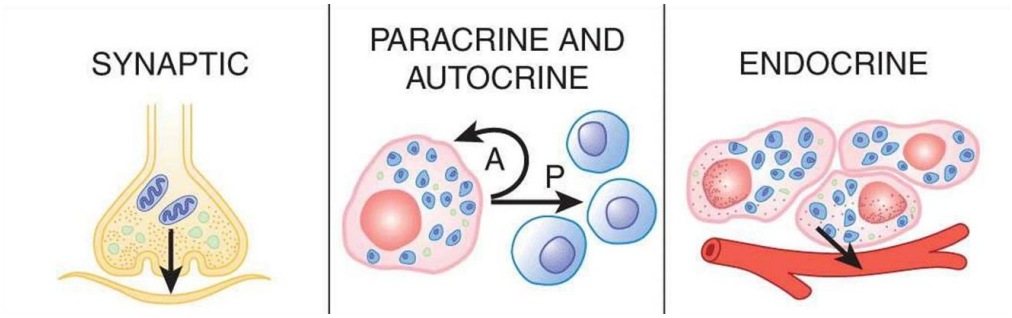
Elfeledkeztem az igért bestiákról, azaz az idegsejtek alap, jelfeldolgozó ingerületátvitelen túli modulációjáról és kommunikációjáról. No ez a bejegyzés lesz a bestiárium. Az ókorban és a középkorban az emberek jelentős része járóföldnél messzebb nem hagyta el szülőhelyét. És ahogy a mondás mondja: „messziről jött ember azt mond, amit akar". A távoli földekről érkező kereskedők hajósok mindenféle furcsa dolgokról meséltek. Az ilyen furcsa lényeket összegyűjtő leírásokat hívták bestiáriumoknak.

Az idegsejtek evolúciójáról szóló bejegyzésekben nem említettük azt, hogy az idegsejtek közötti jelátvivő anyagok, amik a szinaptikus hólyagocskákból felszabadulnak nem a semmiből ugrottak elő, bár az evolúció fokozatosságát és régi kacatokat felhasználó barkácsolókedvét sokat emlegettük. Számos ingerület átvivő anyag, mint az egysejtűek közötti kommunikáció hordozóanyaga, majd a többsejtűek kialakulásakor, mint hormon kezdte pályafutását. A hormonok ugye belső elválasztású mirigyekből (mellékvese, pajzsmirigy) vagy más funkcióval is bíró szervekből (vese, máj) szabadulnak fel a véráramba és segítenek a szervezet



A szervezet belső elválasztású, hormontermelő mirigyei: hipofízis, pajzsmirigy, mellék pajzsmirigy, hasnyálmirigy, mellékvese, here és petefészek.

alkotóelemeinek hatékony, bár viszonylag lassú szabályozásában. De az agyból is szabadulnak fel hormonok, melyek más hormonok termelődését szabályozzák (TSH, GHRH) a hormontermelésre szakosodott belső elválasztású mirigyekben (a pajzsmirigy, és az ivarmirigyek a célterületei az előzőben zárójelezett hormonoknak).



A molekuláris jelátvitel lehetőségei a szervezetben és az idegrendszerben. A leggyorsabb és legcélzotabb az idegsejtek közötti szinaptikus jelátvitel. Az autokrin és parakrin esetben (idegsejtek esetében nem-szinaptikus átvitel) a jel lasabba. meszebb szivárogva terjed, míg az endokrin esetben a véráramba kerülő anyagok viszik lassan és messzire a jeleket.)

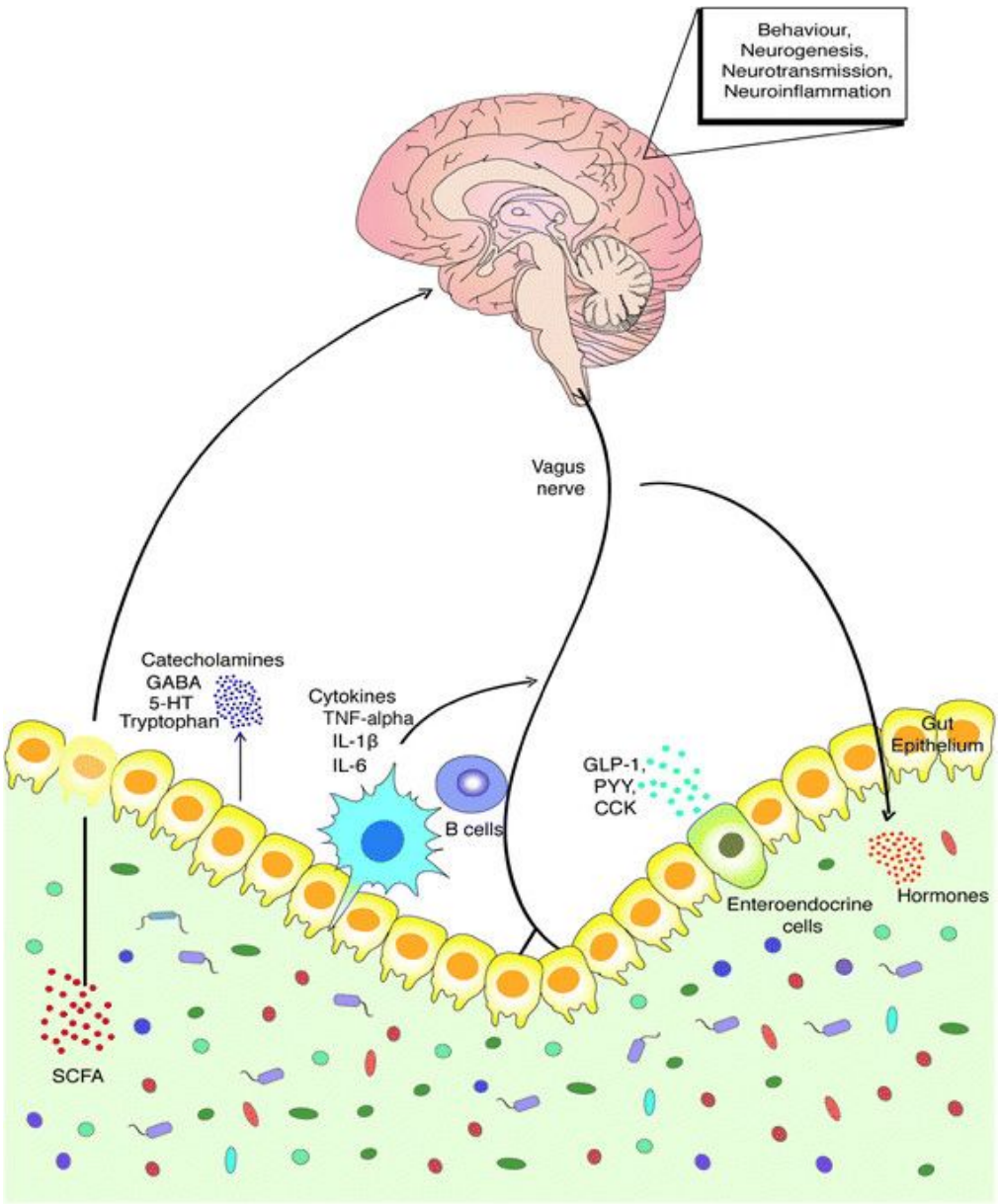
A gyors és helyileg ható szinaptikus átvitel és a lassú, a véráramon keresztül az egész szervezetre ható hormonális (endokrin) jelátadás között van még két közbeeső léptékű hatásmechanizmus is, a parakrin és a nem-szinaptikus idegi jelátvitel. A parakrin jelátvitelnél a testet alkotó szövetek sejtjeiből szabadul fel egy hormon hatású anyag, ami elszivárog a környezetbe és a közelében ható sejtekre hat.
A nem-szinaptikus átvitel az idegrendszer sejtjei között figyelhető meg. Itt az történik, hogy bizonyos idegsejtek axonvégtalpaiból felszabaduló átvivőanyagok nem csak a helyi szinapszisban fejtik ki hatásukat, hanem a szinapszisból kijutva a környező szinapszisokhoz is eljutnak, és azok működésére fejtenek ki hatást. Az is gyakran előfordul, hogy az axonterminálishoz nem is tartozik közvetlenül szinapszis, hanem csak a környező térbe szabadul fel a (nem szinaptikus) transzmitter. A nem idegrendszeri sejtek esetében használnak még egy fogalmat az autokrin-t, ez azt jelenti amikor a sejtből felszabaduló anyag a sejt más részein elhelyezkedő receptorokra hatnak. Ez igazából a parakrinnek és a nem-szinaptikusnak felel meg, csak nem egy másik sejtet hanem saját magát befolyásolja a sejt jelátvivő molekulák útján.

Van itt tehát egy lépték-sebesség létra. A lassan, de nagy területen ható, mindenhová eljutó hormonális jelátvitelnél célzottabb és kicsit gyorsabb a parakrin jelátvitel. Ennél még kisebb léptékű és nagyobb sebességű a nem-szinaptikus idegi átvitel, végül a létra másik végén a leggyorsabb és legcélzottabb átviteli mód a szinaptikus ingerületátvitel áll.



Pletyka lánc

Az emberi kommunikációnak is van hasonló létrája. Valakinek a fülébe pusmoghatom az üzenetemet, a kocsmában terjeszthetek egy pletykát, régebben feladhattam egy apróhirdetést, ma írok egy blogbejegyzést, vagy írok egy könyvet, amit sok példányban kiadnak. Egyre lassabban, de egyre több emberhez jut el az üzenetem. De gyakran az üzenet hatása is más. Egy direkt megszólítás hatása azonnali, míg egy könyvben kifejtett gondolatok lassan és hosszú időre megváltoztathatják egy embernek, egy társadalomnak a gondolkodását, működését.

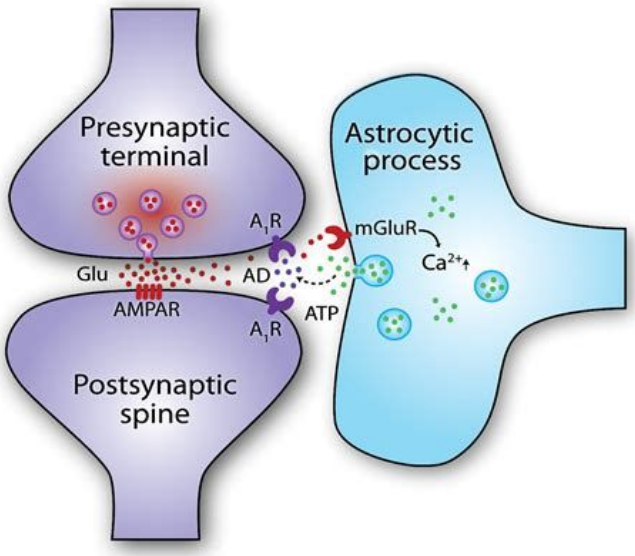


A mikrobióta-bél-agy tengely kulcsfontosságú kommunikációs útvonalai. Számos útvonal létezik, amelyeken keresztül a bélrendszerünkben élő baktériumok jelezhetnek az agynak. Ezeken a kommunikációs útvonalakon keresztül a mikrobióta-bél-agy tengely olyan központi élettani folyamatokat szabályoz, mint az idegsejtek közötti jelátvitel, az idegsejtek képződése, az idegrendszeri gyulladások és a neuroendokrin jelátvitel. A bélmikrobióta károsodása mindezen folyamatok változásához vezethet. A bélmikrobióta változását figyelték meg neuropszichiátriai betegségekben, ami magyarázatot adhat az ezekre az állapotokra jellemző viselkedési rendellenességekre. A folyamatokban az alábbi jelátvivő anyagok játszanak szerepet: 5-HT szerotonin, CCK kolecisztokinin, GABA γ-aminovajsav, GLP glükagonszerű peptid, IL interleukin, PYY peptid YY, TNF tumor nekrózis faktor.

Sok agyi szinaptikus transzmitter a bélidegrendszerben parakrin átvivőanyagként kezdte pályafutását, például a hangulatunkat befolyásoló szerotonin (5-HT). Egy érdekes adalék ehhez a történethez, hogy az elmúlt évtizedekben végre az orvostudomány kezdi felismerni, hogy a szervezetünkben élő milliárd mikroorganizmus nagyobb része nem ellenségünk, hanem barátunk. Alapvető szerepet játszanak szervezetünk felépítésében és működésében. A bélben élőkről kiderült, hogy még hangulatunkat is meghatározzák. Számos bélbaktérium szerotonint termel ezzel hozzájárul egészséges hangulatunkhoz. Ha valaki rosszul táplálkozik vagy egy antibiotikum kúra megváltoztatja bélflóráját komoly változásokat figyelhet meg

hangulatában.

Ahogy az evolúció során egymásra rakódtak a jelátvitel egyre finomodó és gyorsuló térbeli és időbeli rétegei, ezek nem egymástól függetlenül működtek, hanem kölcsönhatottak egymással és egy gazdag sokoldalú szabályozás alakult ki. A kölcsönhatások különböző szintjeinek egymásba gabalyodására egy jó példa, hogy miért leszünk álmosak a nap végére és miért fáradunk el jobban, ha sokat figyeltünk és tanultunk, mintha lustálkodunk. A gyors információfeldolgozás során agykérgünkben a serkentő szinapszisokon rengeteg információ áramlik, és mint azt majd a tanulásról szóló bejegyzésben tárgyaljuk, a serkentő szinapszisok erőssége a tanulás során megnő. Így a nap során a serkentő kapcsolatok erőssége lassan növekszik, ami kicsit „ingerlékenyebbé" teszi őket is, meg minket is (lásd: estére síróssá váló kisgyerek). Hogy agyunk ezt a hatást mérsékelje, amikor az idegsejtek működnek egy adenozin nevezetű anyag szabadul fel lassan és szétárad az agyban. Hatására (nem-szinaptikus, akár parakrinnak is mondható az idegrendszeren belül) a serkentő jelátvitel erőssége kicsit gyengül, a megerősödő szinapszisokat egyensúlyban tartja. Ennek járulékaként álmosnak érezzük magunkat. Amikor alszunk, az álom során idegsejtjeink kapcsolatai átépülnek, az újonnan tanultakért felelő kapcsolatok megerősödnek, a többiek viszont arányosan gyengülnek. Ezzel párhuzamosan az adenozin pedig eltűnik az agyszövetből (az asztrogliasejtek segítségével). Reggel kipihenve, megokosodva és a másnapi tanulásra felkészülve ébredünk. Nem csoda, hogy ha alvásmegvonás miatt az adenozin nem tud kiürülni a szervezetünkből akkor lelassulunk, hibákat vétünk és ingerlékenyek leszünk.



A preszinaptikus axonvégződésből a serkentő glutamáttal együtt ATP (adenozin) is felszabadul, ami aztán a szinapszis mindkét oldalán adenozin receptorokhoz kapcsolódva csökkenti az átvitel erősségét. A nap során az adenozin felhalmozódik. Alvás alatt az asztrocita nyúlványok eltávolítják az adenozint és helyreállítják a jelátvitelt.

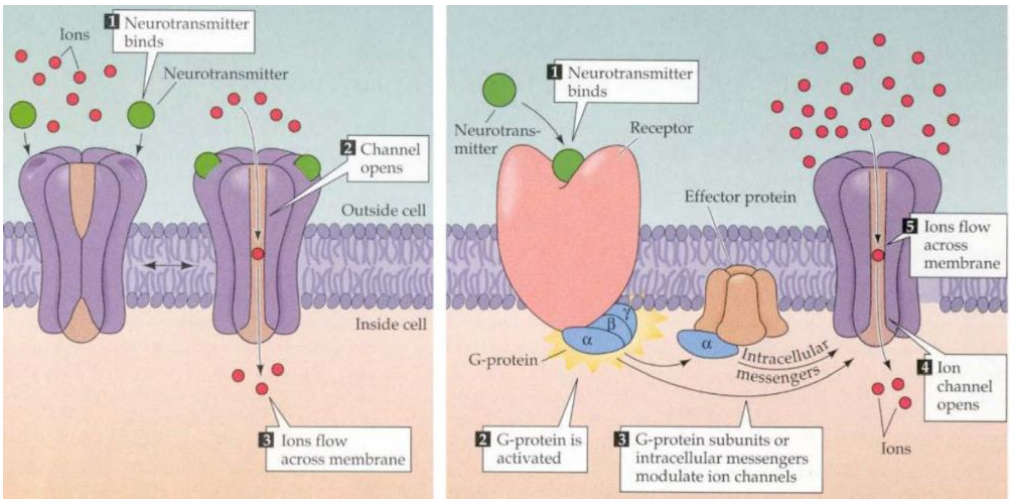
Túránk szempontjából a létra két utolsó foka a szinaptikus és a nem-szinaptikus átvitel a legfontosabb. A jelfeldogozásban alapvető szinaptikus jelátvitelről már beszéltünk korábban. Mint ahogy a serkentő és gátló jelátvitelben részt vevő glutamát és GABA receptorairól is, amelyek a szinapszisok dendrit felőli oldalán ülnek (posztszinaptikus oldal). Ők egyben ioncsatornák is. Amikor átvivőanyagot érzékelnek a szinaptikus résben, a rájuk jellemző ionok áramlását engedik meg a sejthártyán keresztül, ezzel serkentő vagy gátló áramokat váltanak ki. Szót ejtettünk még néhány ion-pumpáról és a feszültség érzékeny Na^+ és K^+ csatornákról, melyek a membránpotenciál fenntartásában és az akciós potenciál terjedésében játszanak fontos szerepet.
A következő bejegyzésben körbejárjuk milyen molekulák vesznek részt a különböző átvitelu típusokban és hogyan hangolják a sejtek jelösszegzését.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az idegsejtek működésének hangolása II: A jelösszegződés finomhangolásának módjai

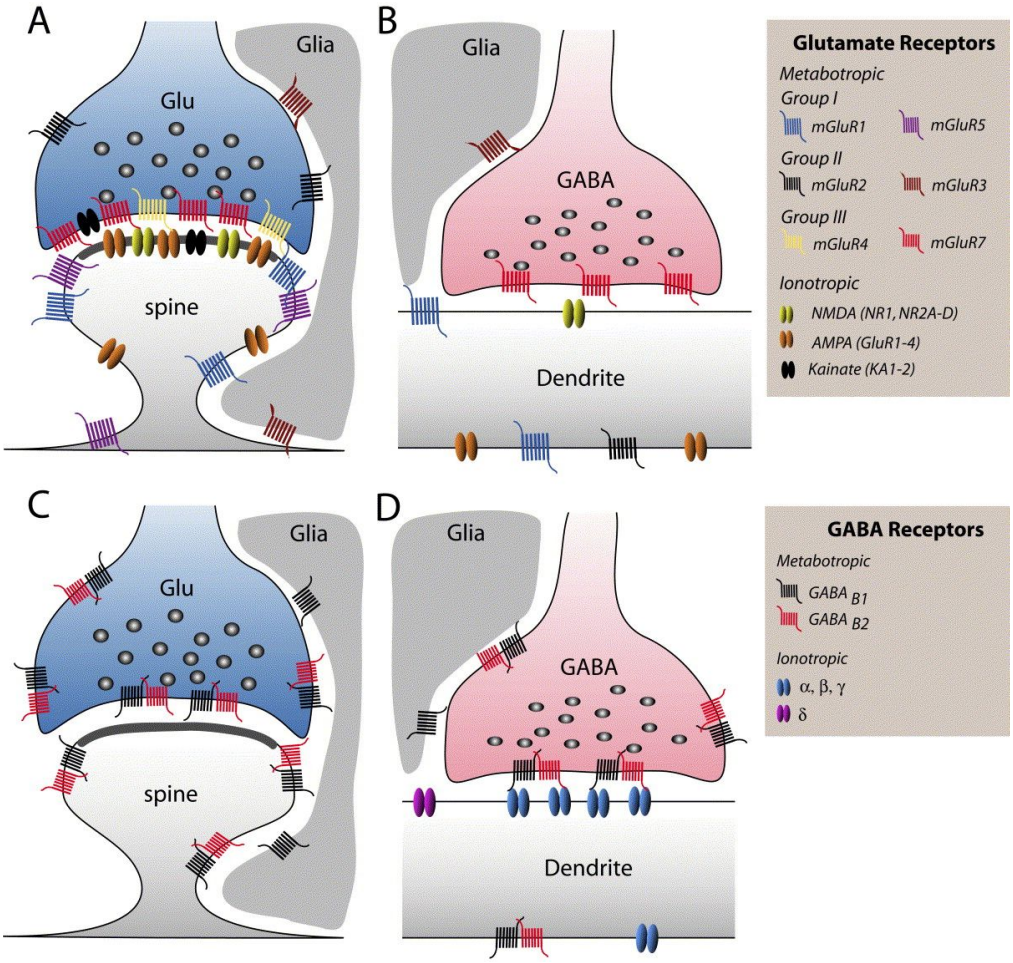
Ahhoz, hogy megérthessük a nem-szinaptikus jelátvitel miért fontos a jelfeldolgozásban, el kell engednünk még egy egész csordára való bestiát, mégpedig beszélnünk kell néhány további átvivőanyagról, amiket az idegrendszer bonyolódása bejegyzésben említettünk, a sejthártyában található különböző receptorok és ioncsatornák családjairól, ezek kölcsönhatásáról és a sejtek működésének hangolásában betöltött szerepükről.

Kezdjük a szinaptikus és nem szinaptikus átvitel sajátosságaival. A szinaptikus átvitelben ható klasszikus gyors transzmitterek, mint, pl. glutamát és GABA gyorsan (1-4 msec) és kis távolságon (~1 µm) dolgoznak, mivel a szinaptikus résbe szabadulnak fel, ahol koncentrációjuk nagy marad. Az axonterminálisból a sejtek közötti térbe, vagy a szinapszisból kiszabaduló moduláló jellegű átvivőanyagok (acetil-kolin, szerotonin, noradrenalin stb.), mivel messzebb és nagyobb térrészbe jutnak el (~5-50 µm) lassabban hatnak és alacsonyabb koncentrációban vannak jelen (az anyagok egy része mindkét módon hathat). A két esetben a hatást más típusú receptorok közvetítik. A gyors esetben a receptorok egyben ioncsatornák is (ionotróp receptorok), azaz az anyag kötésekor rájuk jellemző arányban engedik be az idegsejtek membránpotenciálját meghatározó ionokat, hiszen a leggyorsabban elektromos áram útján lehet egy idegsejtet befolyásolni. Ilyen receptor két korábbi ismerősünk a glutamát AMPA receptora és a GABA A receptora. A lassú receptorok maguk nem ioncsatornák, hanem valamilyen módon a sejtek belső jelátviteli rendszerére (másodlagos hírvivő rendszer) kapcsolódnak rá (metabotróp receptorok) és közvetve, lassan, elnyúlóan (50-200 msec vagy akár percek) kapcsolhatnak be/ki egy vagy akár több fehérjét, amelyek ioncsatornaként működve megváltoztatják a sejtek membránpotenciálját és elektronikus tulajdonságait. A dolgot tovább cifrázza, hogy egyetlen, a sejt membránfolyamataiban szerepet játszó fehérjét nem csak egy, hanem több jelátviteli rendszer is befolyásolhatja, akár ellentétes irányokba is. Ezért a metabotróp receptorok, másodlagos hírvivő rendszerek és az általuk befolyásolt fehérjék egy bonyolultan kölcsönható szabályozó hálózatot alkotnak.



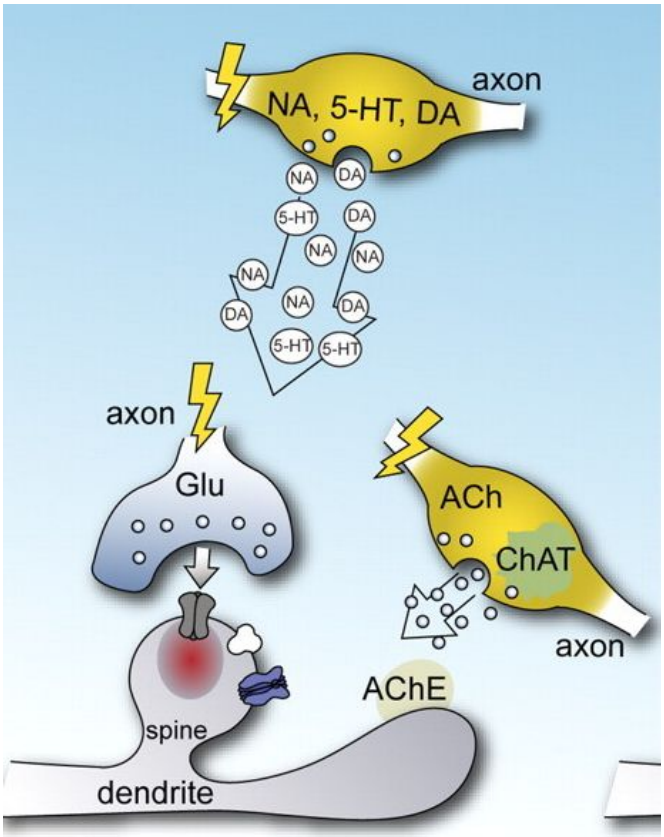
Az ionotróp és metabotróp receptorok jelátvitele. Baloldalt egy ionotróp, azaz egyben ioncsatornaként szolgáló receptor látható. Amikor a receptor átviőanagot köt (1), kinyílik (2) és a receptorra jellemző beáramló ionok megváltoztatják a membránpotenciált (3). Jobboldalt egy metabtróp receptor és a hozzá tartozó jelátvivő molekularendszer látható. A rceptor önmaga nem ioncsatorna. Amikor átvivőanyag molekulát köt (1), megköt és módosít egy sejten belüli átvivőanyagot (2, itt G fehérje). Ez elszivárog (3) egy hangolható ioncsatornáig és azt kinyitja (4). A csatornára jellemző beáramló ionok (5) megváltoztatják a membránpotenciált.

A glutamátnak több eltérő típusú metabotróp receptora is van (mGluR 1-5ig), melyek eltérő másodlagos sejt jelátvivő rendszerekhez kapcsolódhatnak és a célsejtek eltérő részein elhelyezkedve eltérő, akár ellentétes hatásokat is kifejthetnek. A GABA B receptora is ilyen, ha ez aktiválódik, a felszabadított másodlagos hírvivő anyagok hatására az idegsejt hártyájában egy K^+ csatorna nyílik meg és a sejtből kiáramló K^+ áram a sejtet hiperpolarizálva annak aktivitását csökkenti. Míg az ionotróp receptorok majdnem mindig a szinapszisban a posztszinaptikus oldalon találhatók, a metabotróp receptorok a szinapszis szélén, a szinapszison kívül, de még az axonon is előfordulhatnak. Például, mind a GABA-nak mind a glutamátnak található metabotróp receptora legtöbb axonterminálison, melyek aktivációja csökkenti a további axon-terminális aktiválódást és ezért negatív visszacsatolással képes szabályozni a túlzott ingerületátvivő anyag felszabadulást.



A GABA (alsó sor) és a glutamát (felső sor) különböző típusú receptorainak elhelyezkedése serkentő (bal oszlop) és gátló (jobb oszlop) kapcsolat esetében. Az inonotróp (azaz egyben ioncsatornaként is szolgáó) receptorokat kávészem szerű elemekként, a metabotróp receptorokat (melyek maguk nem ioncsatornák) apró radiátor szerű elemekként tünteti fel az ábra 4 része. Az A részábra azt mutatja, hogy a serkentő átvitel esetében számos ionotróp glutamát receptor található a posztszinaptikus oldalon a szinapszisban. Metabotróp glutamát receptorok az axonterminálison mind szinaptikusan, mind a szinapszison kívül, sőt a posztszinaptikus oldalon is találhatók. Hasonló a helyzer a D ábrán, ami a GABA receptorok elhelyezkedését mutatja egy gátló kapcsolatban. Látszik tehát, hogy mind a glutamát, mind a GABA befolyásolja saját átvitelét. A B és a C ábra a két átvivőanyagrendszer egymásra kifejtett hatását mutatja. A gátló (GABAt használó) kapcsolat is tartalmaz glutamát receptorokat. Illetve, C, a serkentő kapcsolatban is találhatók GABA receptorok (itt csak metabotróp) mindkét oldalon. Ez a bonyolult elrendezés a jelátvitel bonyolult tér és időbeli modulációját teszi lehetővé a serkentő és gátló aktivitás és kölcsönhatásuk függvényében.

A két receptorcsalád között még egy jelentős különbség van, a gyors receptorok csak akkor nyílnak ki, ha az ingerületátvivő anyaggal nagy töménységben találkoznak (hiszen a szinapszisba ömölve az átvivőanyagok koncentrációja magas). A metabotróp receptorokra viszont már alacsony koncentrációban is hatásos egy átvivőanyag (hiszen a szövetben szétterjedve kihígul). Bár finomabb jeleket érzékelnek, hatásuk nem gyengébb, hiszen a sejt belső jelátvivő rendszerei felerősítik. Hatásuk, mint írtuk lassú, elhúzódó, hangolják a sejtek jelfeldolgozó képességét. Mivel a nem-szinaptikus kommunikációban nem szigorúan célzott a sejtek közötti jelátvitel, fontos abban, hogy eltérő ingerületátvivő anyagokat használó agyi rendszerek együttműködjenek. Ez az agyi jelfeldolgozás újabb lehetőségét nyitja meg, mert például az agykéreg alatti, a szervezet homeosztázisát biztosító agyterületek eltérő transzmittereket használó sejtjeiből felszabadító anyagok (szerotonin, dopamin, adrenalin) a nem-szinaptikus kölcsönhatások útján is egyfajta kölcsönhatási hálóba lépnek.

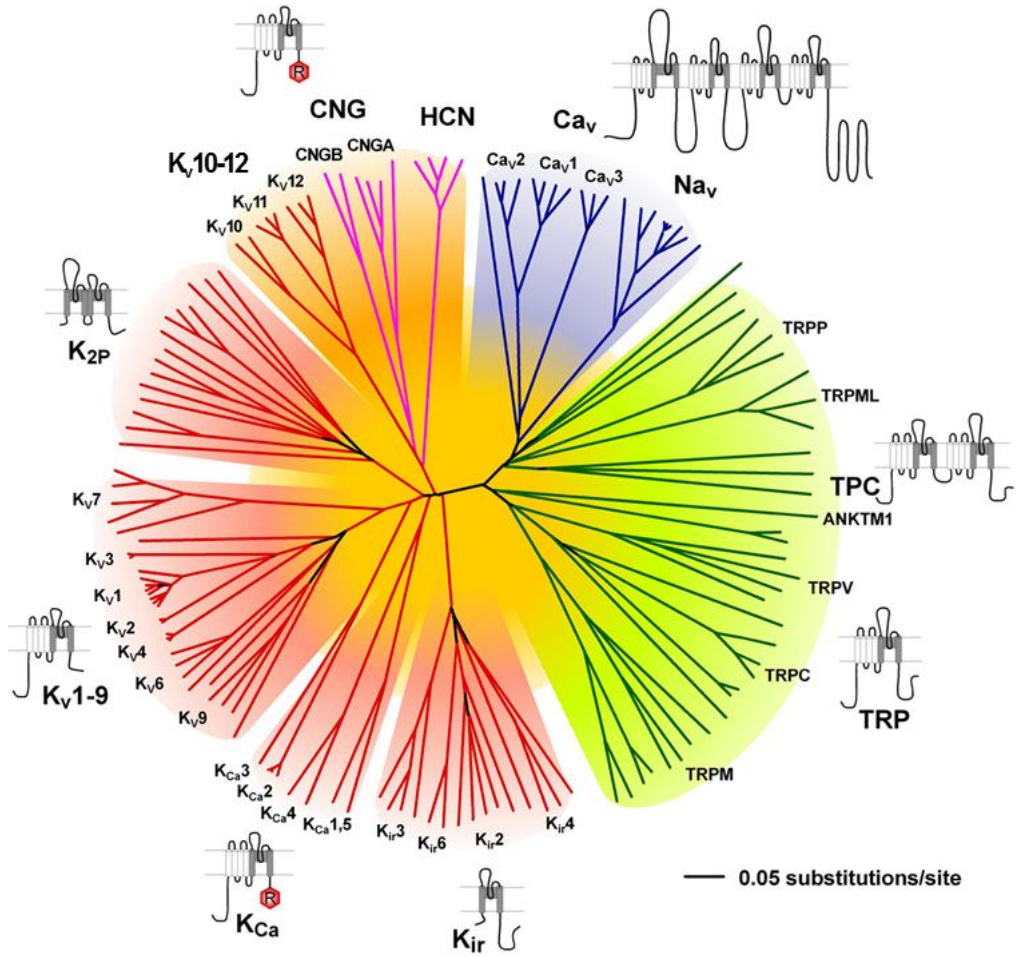


A lehetséges ingerületátvió anyag kölcsönhatások és ezért a hangolás lehetőségei közel végtelenek. A példán egy kéreg alatti területről felszálló nemszinaptikusan noradrenalint, szerotonint vagy dopamint felszabadító axon látható. A felszabaduló átvivőanyagok befolyásolják a balra alul található serkentő ingerületátvitelt. De még olyan is alőfordul, hogy a sejtek működését hangoló (szintén nem szinaptikusan ható) acetil-kolint felszabadító axonokból (jobb alsó sarok) is hangolják a moduláló átvivő anyag felszabadulását. Ezek a kölcsönhatásoksegítik elő, hogy a szervezet eltérő belső állapotainak és motivációnknak megfelelő módon történjen meg az idegrendszerben a jelfeldolgozás.

Az utolsó csavarok vannak hátra. Sok transzmitter gyorsan és lassan is tud hatni (akár ugyanabból az axonterminálisból felszabadulva). De ezt ugye már ki lehetet találni abból, hogy az alap, gyors transzmittereknek: a glutamátnak és a GABAnak is van ionotróp és metabotróp receptora. De fogadok azt senki nem találta ki, hogy vannak olyan idegsejtek, amiknek az axonjából egyszerre többféle (gyors és lassú hatású) transzmitter is felszabadul.

Nézzük meg hogyan mire is ez a nagy hajcihő? Milyen sejtfunkciókat befolyásolhatnak a moduláló jellegű, metabotróp receptorokon keresztül ható ingerületátvivő anyagok.
A sejtek nyugalmi, valamint az ingerületterjedés és jelösszegzés során változó membránpotenciálját számos Na-csatorna család, de még fontosabban, különböző K és

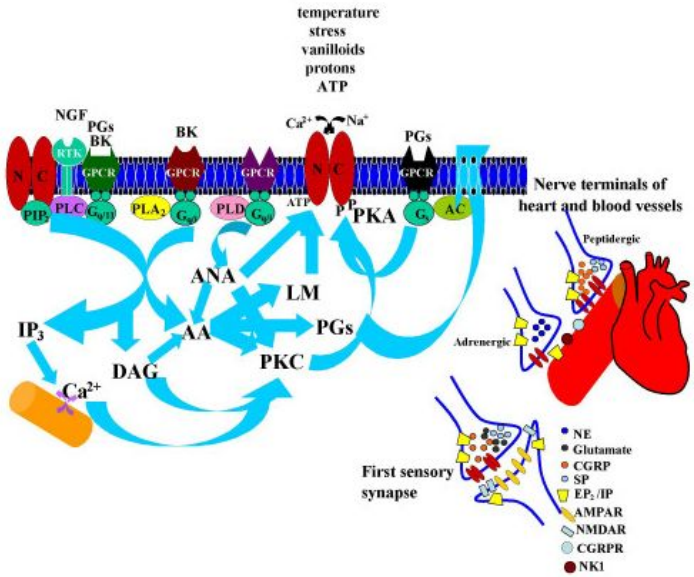
Ca csatorna családok állítják be. Vannak olyan K és Ca csatornák, amelyek feszültség függőek, azaz a membránpotenciál változásának hatására nyílnak vagy záródnak. Eltérő típusaik más feszültségszintre és hosszabb vagy rövidebb idő eltelte után reagálnak. De olyan K és Ca csatornák is vannak, amelyek a másik ion koncentrációjának



Az ioncsatornák családjai molekuláris szerkezetük alapján fába rendezve. A keskeny kék szelet jobb oldalán találhatók a feszültség függő Na csatornák, tőlük balra a feszültségfüggő Ca csatornák. A K csatornák népes családját a narancs és a piros cikkelyek jelzik. Ezek között vannak metabotróp K csatornák, feszültség és Ca szint érzékeny K csatornák. Zöld jelöli a TRP csatornák családját. Ők a szervezet sejtjeiben találhatók és a külvilág ingerei (fájdalom, hőmérséklet, íz, nyomás) hatására aktiválódnak.

megváltozásakor nyílnak vagy csukódnak. Itt most nem megyünk bele a részletekbe, hogy hogyan, de a megfelelő helyre, megfelelő keverékben elhelyezett csatornák képesek jelentősen megváltoztatni a sejtek jelfeldolgozó tulajdonságait. A K csatornák fontos szerepet játszanak a sejtek nyugalmi potenciáljának beállításában, azaz meghatározzák egy sejt mennyire aktiválható és mennyi serkentő bemenetet kell kapjon ahhoz, hogy kisüljön. A Ca csatornák a jelösszegzésben, jelerősítésben és a jelek kölcsönhatásában játszanak elsősorban szerepet. A K, Ca és Na csatornák összjátékából alakul ki, hogy egy sejt mikor aktiválódik, illetve az aktiválódott sejt milyen mintázatban és mennyi akciós potenciált bocsájt ki magából. Más csatornakombinációval ellátott sejtek (melyeket a genetikai program és a hálózatban való elhelyezkedésük formált) más módon összegzik a jeleket.

És itt jön a hangolás (moduláció). A metabotróp receptorok által ki vagy bekapcsolt másodlagos hírvivő rendszerek molekulái képesek arra, hogy a csatornák megfelelő részeihez kapcsolódva megváltoztassák azok tulajdonságait és ezáltal a sejtek jelfeldolgozását, jelkibocsájtásának ritmusát. Mivel számos moduláló rendszer (szerotonin,



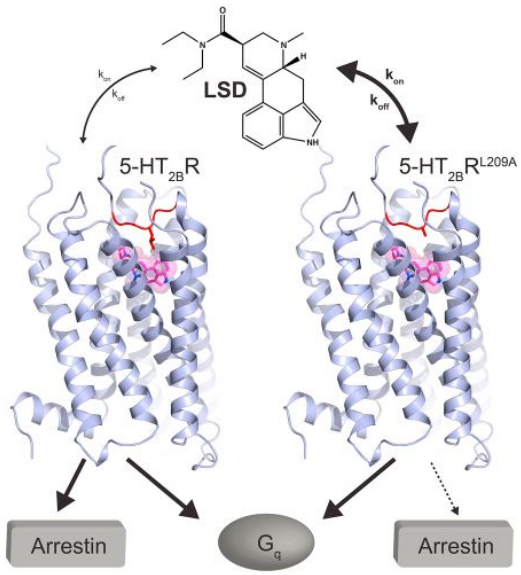
A metabotróp receptorok, másodlagos hírvivő útvonalak és ioncsatornák kapcsolódása. Az ábrát ne is próbálja senki részleteiben megérteni. Én se tenném :). Azért mutatom be hogy érzékeltessem milyen összetett don képes többféle metabotróp receptor a másodlagos hírvivő rendszereken kersztül akár többféle ioncsatorna működését is hangolni, és ezáltal megváltoztatni a sejtek jelintegrációját. A zöld, barna, lila és fekete sokszögek a receptorokat, a kék nyilak a másodlagos hírvivő rendszerek összekapcsolódását, a piros ellipszisek pedig z általuk szabályozott ioncsatornákat jelölik.

dopamin, noradrenalin, hisztamin) mindegyike több metabotróp receptoron hat, ezek pedig több, egymással kölcsönható, másodlagos hírvivő rendszeren keresztül eltérő típusú ioncsatornákat ez egy igen sokodalú, kifinomult mechanizmus. Ezt a hálózatot is tekinthetjük egyfajta jelfeldolgozásnak és bizonyára sokat csizolta az evolúció, hogy mindenki-mindenkivel a túléléshez leghatékonyabb módon hasson kölcsön.

Egy példa: amikor egy állat a környezetében valami fontos dologgal találkozik egyik kéreg alatti területéről (bazális előagy) acetil-kolin szabadul fel. Az acetil-kolin többféle receptoron keresztül a másodlagos hírvivő rendszerek útján a sejtek dendritjein, sejttestén és axonterminálisaiban számos K csatorna működését megváltoztatja. Ezáltal a sejtek serkenthetőbbé válnak, könnyebben kisülnek ugyanarra a beérkező jelmennyiségre. Igaz közben axonterminálisaikból kisebb valószínűséggel szabadulnak fel a transzmitterek, azaz a jelátvitel erőssége csökken. Az acetil-kolinnak a sejtek jelintegrációjára és jelátvitelére gyakorolt hatásának eredményeképpen megváltozik az agy aktivitásának mintázata.



A Google Deep Dream hálózat által hallucinált ég képe. Mint ahogy az LSD és túl erősre állít bizonyos iderendszeri visszacsatolásokat, a Deep Dreamben is ha túl erősre kapcsuolják a



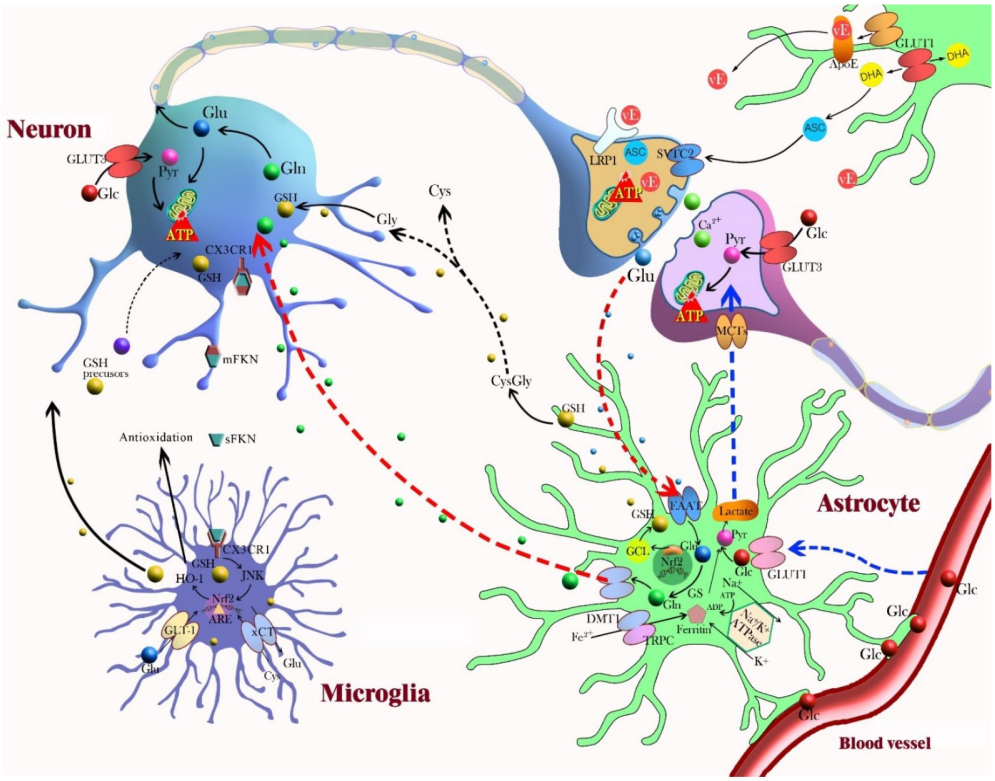
Az LSD a szerotoninhoz hasonlóan (5HT) a szerotoninn 2A típusú receptorához kötődik és megzavarja a látókéregben található 5-HT 2A receptorokkal felszerelt gátlósejtek működését.

Egy izgalmasabb példa az LSD hatása. Az LSD a szerotionin (5-HT) egyik receptorán hat és a gátlósejtek K csatornáit hangolja. Hatására a gátlósejtek kicsit gyengébben ellenőrzik a hálózat aktivitását. Mivel ebből a receptorból a látókéregben van a legtöbb LSD hatására a látórendszer kicsit túlreagál és a Google Deep Dreeaming-hez hasonló képeket láttat.

Az idegsejtek modulációja ahhoz hasonlít, mint amikor számítógépünk energiatakarékos üzemmódba kapcsol, mert akkumulátorának töltöttségi szintje a beállított szint alá esik. Ilyenkor „felszabadul" egy üzenet az operációs rendszerben, melynek hatására gépünk lekapcsolja a Bluetooth és WiFi kapcsolatokat, csökkenti a képernyő megvilágítás erősségét és nem végez olyan háttérfeladatokat, amik a processzort az aktuális szükséges feladaton kívül másra is használná. Megváltozott a helyzet, megváltozott az igény, a moduláló jelek átállítják a rendszer elemeinek, és így egészének működését. Itt persze megint a modularitás és az emergencia jelenik meg.

Eddig valamelyest függetlenül beszéltünk a gliasejtekről és az idegsejtek tulajdonságainak

hangolásáról, de fontos azt is megmutatni, hogy a két rendszer nem egymástól függetlenül működik, hanem két, részben párhuzamosan működő, de erősen összefüggő rendszert alkot. Az idegsejtek gyorsan dolgozzák fel a jeleket, a beérkező ingerületet összegzik és kimenő jellé alakítják. Ebben serkenthetőségük és szinapszisaik erősségének mindenkori állapota fontos szerepet játszik.



Az idegsejtek és gliasejtek közötti kölcsönhatások módjai.

A gliasejtek komótosabbak, térben és időben nagy léptpékben követik az eseményeket és lassan reagálnak, lassú gyenge membránpotenciál változásokat mutatva, melyek lassú átlagai számos idegsejt membránpotenciáljának. Mivel az idegsejtek aktivitásának megfigyelésével és lassan visszacsatolt szabályozásával részt vesznek az idegsejtek anyagcseréjének, aktivitási szintjének, szinaptikus átvitelének szabályzásában, valamint a szinaptikus súlyok megváltozásának , a tanulásnak a szabályozásában, ők is részt vesznek az idegrendszer jelfeldolgozásában, csak egy másik időskálán (lásd az adenozin és az álmosság esetét az előző bejegyzésben). Mint a séta végén (sok van még ddig) látni fogjuk, az agy az aktuális feladat, a mindenkori magatartási állapot függvényében másodperces skálán módosítja működését, ehhez valószínűleg a gliasejtek is komolyan hozzájárulnak. Amikor az idegsejtek aktivitás gyorsan kezd el emelkedni, számos gliális mechanizmus indul be, amely biztosítja az agy kiegyensúlyozott működését, az agy homeosztázisát.

Szerző: **Gulyás Attila**

SzürkeÁllomány második évad: a hálózatok kialakulása

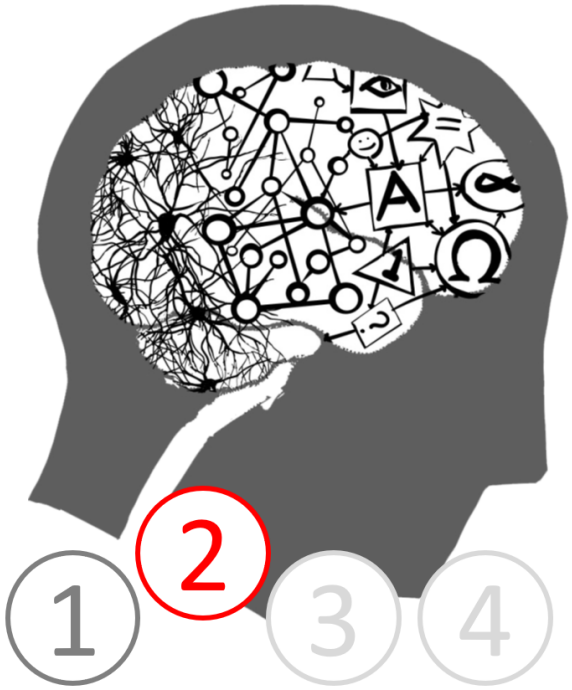
Kedves Olvasók!
A nyári szünet után folytatjuk! Az #agyséta szál az agy legalsó szerveződési szintjén kezdett el építkezni, megmutatta azt, hogy a fehérjemolekulák, sejthártyák és ionmozgások összjátékából hogyan alakul ki a jeleket integráló idegsejtek működése és

szintje.



Neuronhálózat 3D grafikus megjelnítése

Ebben az évadban a következő szerveződési szintlépést tesszük meg: hogyan alkot sok idegsejt információ feldolgozásra, tanulásra, memória előhívásra alkalmas hálózatokat és ezek milyen tulajdonságokkal rendelkeznek. Megismerkedünk az agykéreg modulok felépítésének alapelveivel, a tanulás sejt és molekuláris szintű folyamataival, hogyan kódolják az idegsejtmintázatok az információt és hogyan dolgozzák fel.



Hogy ne riasszuk el azokat se, akik szívesebben olvasnának a neuropszichológia, neurofilozófia és a tudat témájában, a Ponyvaregény (Pulp fiction) és Memento című filmekben megtapasztalt idő-bakugrásokkal néhány magasabb szerveződési szinthez tartozó témát is beszúrunk (többek között a beérkezett hozzászólások megválaszolása okán). Kezdjük az agy-elme-tudat-éberség-stb. fogalmak biológiai-filozófiai körbejárása és belekóstolgatunk az AI, AGI, alignment fogalmaiba is.

Mindenkinek értékes tapasztalatokat, izgalmas kérdéseket és szárnyaló gondolatokat kívánunk!

Rendrakás az agy, elme és AI fiókjaiban I.: A tudatos agy funkcionális darabolása

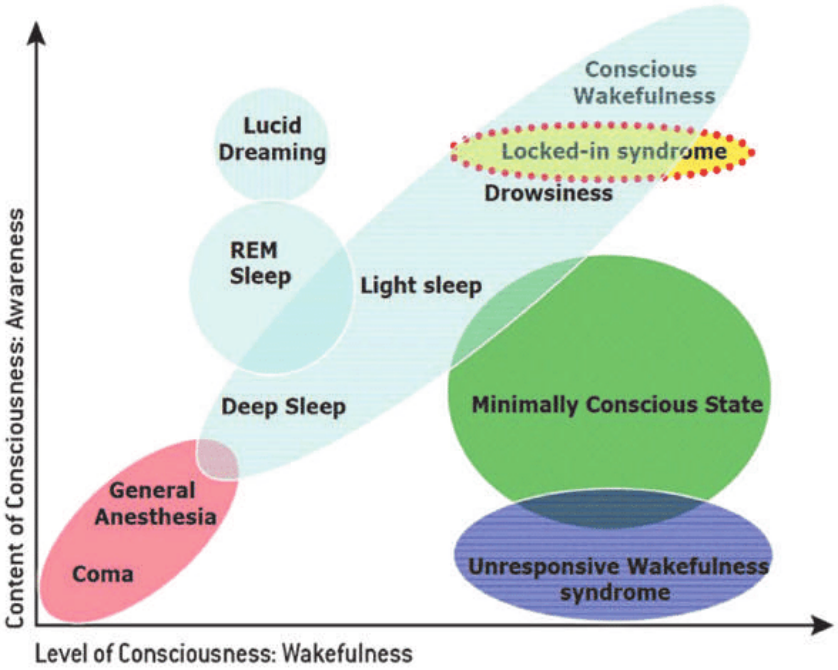
Az évadnyitóban említettem, hogy az #agysétán ezentúl időnként előretekintünk. A jelen és a következő bejegyzés inkább egy hőlégballonos felszállás, ahonnan rátekinthetünk a terepre és megtanulhatjuk a hegyek-völgyek neveit. Általános, fontos fogalmakat tisztázunk, melyekbe már magyarul is angolul is beleszaladhatott, akit érdekel az agyműködés vagy a másik oldalról nézve a pszichológia. A harmadik és negyedik bejegyzés, ahol a természetes és mesterséges intelligencia kérdéseit érintjük, kevésbé kemény tényeken alapuló tudomány, mint vélemény és filozofálgatás.

Kezdjük a fogalmakkal…

Angol kupac: *brain, mind, consciousness, self conscious, aware(ness), alert(ness), awake(ness), vigilance, attention, intelligence*
Magyar kupac: agy, elme, tudat, éntudat, tudatosság, éber(ség), ébrenléti szint, figyelem, intelligencia

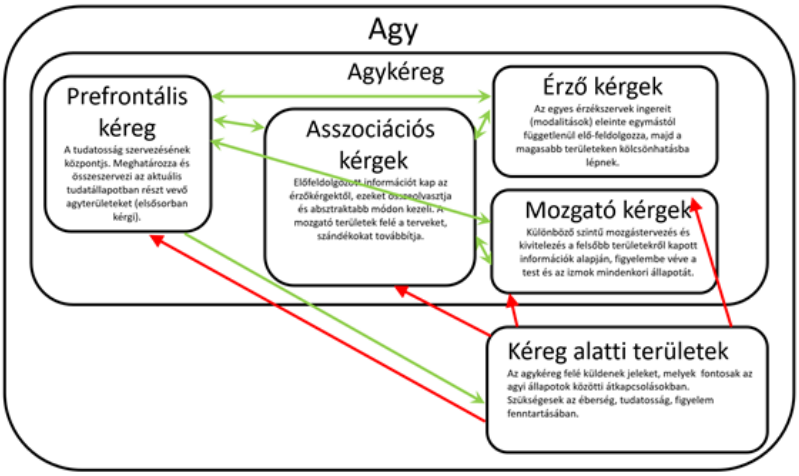
... ugyanis rendet kell rakjunk közöttük. Fontos, hogy ugyanazt a nyelvet beszéljük, hiszen, sok félreértésre ad okot, amikor az egyik fél máshogy értelmez egy fogalmat, azaz más dolgokat köt hozzá, mint a másik. Még az sem teljesen egyértelmű, hogy az angol és a magyar fogalmak miképpen felelnek meg egymásnak. Megvallom a bejegyzés megírásához, az egyértelműséghez, nekem is rendet kellett tennem a fejemben, sokat olvastam, hogy ne (nagyon) hibázzak. Ehhez a legtöbbet a „The Neurology of Consciousness" könyvből tanultam. Ezt azért kezdőknek nem ajánlom, mert kemény tudományos nyelven íródott, de alaposan végigjárja a tudatossághoz szükséges utóagyi, középagyi és előagyi rendszereket, az éber, alvó, kóros tudatállapotokat és hogy ezek milyen agyi akivitásmintázatokkal kísértek. Végül megismertet a különböző szintű agykárosodások után fennmaradó agyi állapotokat (kóma, vegetetív állapot, minimálisan tudatos állapot, *locked-in* szindróma).

Sokan sokféle módon próbálták rendezni e fogalmakat. Leginkább egy sokdimenzós térben lehetne elrendezni ezeket (azaz számos tengely mentén), de az most itt durva lenne. Alant egy példa, mely az agyi állapotokat az *awareness* = éberség /tudatosság és a *wakefullness* = ébrenlét skáláján helyezi el, amiből már rögtön látszik, hogy a két fogalom nem fed át (és a többi tengelyre felhelyezhető fogalmakat nem is említettük).



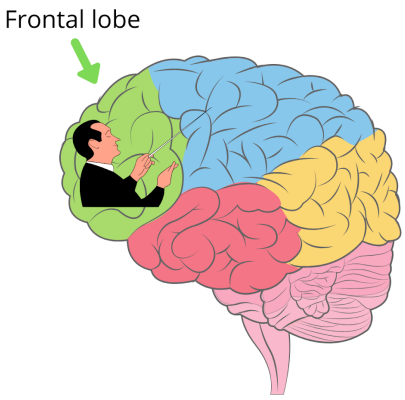
Tudatállapotok ábrázolása az éberség és felébredtség tengelyein.

Én is előállítottam a magam ábráit, természetesen az #agyséta">#agyséta gondolatmenetét figyelembe véve. Kezdjük először annak áttekintésével, hogy melyik agyterületnek mi a szerepe a tudat „működtetésében", mert erre tudunk majd építkezni a fogalmak meghatározásakor. Ha eddig ne lett volna nyilvánvaló, az előző mondatból leszűrhető, hogy elvetjük a dualitást, azaz az elmét az agy működésének termékeként értelmezzük. Ez persze nem meglepő, hiszen ez egy neuropszichológiai alapállású blog.



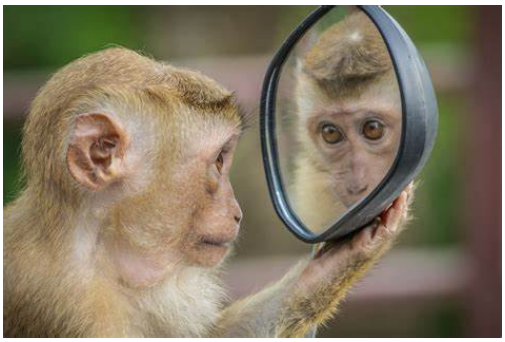
Az agyterületek szerepe a tudat kialakításában.

A tudat működtetéséhez mind a magasabb, itt „Agykéreg”-nek jelölt előagyi területek (de ide tartozik a talamusz és a striátum is pl.), mind a közép és utóagyi, itt „Kéreg alatti területek”-nek jelölt agyterületek hozzájárulnak. Szerepük azonban eltérő. A kéreg allati területek megfelelő működése elengedhetetlen az ébrenlét, az éberség és a működő tudat kialakításában, mivel felszálló pályáik útján befolyásolják és működésben tartják az agykérget. Károsodásuk esetén kóros agyi állapotok, kóma, vegetatív állapot, illetve további, később részletezett állapotok alakulhatnak ki. Az agykéreg több szinten egymáshoz kapcsolódó területei a tudatosság különböző rétegeinek létrehozásában és a kifinomult, gazdag tudattartalmak előállításában fontosak. Az érző területeken megkezdődik az érzékszervekből érkező ingerek feldolgozása, egyszerűbb és összetetteb érzékelése. Ezekről a területekről az információ az asszociációs kérgekbe kerülnek, ahol a különböző érzékszervekből származó információk modalitás független élménnyé alakulnak. De itt történik a mozgástervezés is, testünk aktuális állapotát figyelembe véve. A prefrontális kéreg (homloklebeny) a legmagasabb szintű tudatosság kialakításhoz elengedhetetlen. Ez a székhelye a munkamemóriának, mérlegelésnek, kételkedésnek, a legmagasabb szintű döntéseknek, itt honolnak személyiségünk elemei, itt alakulnak ki gondolataink és hogy mi jó- mi rossz. Ez a terület szervezi -a kéreg alatti területek segítségével- pillanatonként változó, feladat-függően összekapcsolt működő hálózatokba a többi agyterületet, ezzel meghatározva mi kerül be tudatunkba. A tudatos, tudat alatti és tudattalan fogalmai lazán hozzárendelhetők az egyes agyterületekhez. A prefrontális kéreg a tudatos, Ő a karmester, aki irányítja az asszociációs és érző/mozgató kérgek tudatalatti működését, de ezek a kérgek tudat alatt meghatározzák az Ő működését is. Agyunk tudattalan részei a kéreg alatti területekhez és az elsődleges érző/mozgató kéreghez rendelhetők hozzá.



Karmester az agyban

Fontos hangsúlyozni, a tudat nem egy és oszthatatlan. Egyrészt mindennapi életünkben is állandóan változik tudatállapotunk (koncentrálunk, álmodozunk, belülre vagy kívülre figyelünk, elálmosodunk), másrészt az ember tudata más, mint a kutyáé, egéré, gyíké, halé. Emberi tudatunk a feladat és a motiváció függvényében kiterjedtebb, beszűkültebb, egyszerűbb-összetettebb, de agyunk fejlettsége miatt jelentősen kifinomultabb és sokoldalúbb, mint a törzsfa alacsonyabb szintén álló távoli rokonainké. Az egyre kisebb agyak egyre kevesebb specializált agyterülettel bírnak, melyek kisebbek is, ezért a világot



Majom nézi magát a tükörben

kisebb felbontásban, homályos szemüvegen keresztül látják. Ennek szemléltetésére egy példa: otthon tartott tengerimalacaink, amikor csendesen olvasgatok mellettük pillanatok alatt elfelejtik, hogy ott vagyok és minden egyes lapozásnál iszonyatos pánikban szaladnak vissza vackukba, a negyvenedik oldal után sem képesek megtanulni, hogy környezetük eleme vagyok. Egyszerűen a jelenben élnek, nincs rekesz az agyukban a múltnak és a jövőnek, nincs munkamemóriájuk, állandóság fogalmuk. Próbáljátok meg elképzelni milyen lehet egy gyík vagy egy hal tudata és egyből méltányolni fogjátok a sok agyi finomságot, amit őseink „fejlesztettek" (pontosabban az őket gyilkoló evolúciós nyomás).

Az agy és a tudat összekapcsolódásáról, a tudatosság szintjeiről az agyat ért károsodásokat (fejsérülés, daganat, agyvérzés, agyérgörcs, drog) követő neurológiai, pszichiátriai, pszichológiai változások elemzésével sokat tanultunk. Közismert Phineas Gage esete akinek egy balesetben megsérült a bal homloklebenye, melynek eredményeképpen alapvetően megváltozott a személyisége. Akit érdekel Vilayanir Ramachandran: Phantoms in the brain és Jill Bolte Taylor: Mennybe döngölve című könyveiben még a tudat sok furcsaságáról olvashat.



Jill Bolte Taylor

A következő bejegyzésben érkezik az ígért fogalom magyarázat.

Szerző: **Gulyás Attila**

Rendrakás az agy, elme és AI fiókjaiban II.: Agyi szószedet

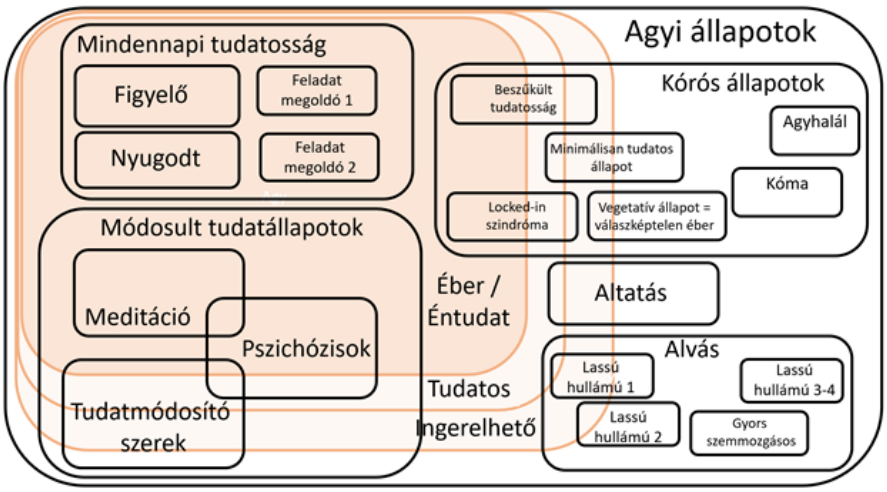
Emlékeztetőnek a két szókupac, amit meg kell magyarázni és össze kell kapcsolni. Csak finoman kössetek belém, mert nem filozófus, hanem neurobiológus vagyok.
Angol kupac: *brain, mind, consciousness, self conscious, aware(ness), alert(ness), awake(ness), attention, intelligence*
Magyar kupac: agy, elme, tudat, éntudat, tudatosság, éber(ség), ébrenléti szint, figyelem, intelligencia

A *brain* / **agy** viszonylag egyértelmű: az a biológiai, anyagi hordozó szerv, amiben az idegsejtek aktivitásmintázata és ezen mintázatok egymásba alakulása hozza létre a mentális állapotokat, hordozza a tudatos elmét.

A másik kettő már bonyolultan egymásba fonódott, egymás vetületei. A magyar tudatállapotot például az angol *mind-state*-nek vagy *conscious-state*-nek mondja. A *consciousness* / **tudat(osság)** az a képesség, jelenség, állapot, amin keresztül egy lény elméje átéli, megtapasztalja a belső és külső világot. A *mind* / **elme** tágabb fogalom, mint a tudat, a mentális képességek, lehetőségek egészének kerete, helyet ad a tudatállapotoknak. Az elme szabályain, szerkezetén keresztül tapasztaljuk meg a világot. Tekinthetjük az elmét a tudat kultúrájának.

Talán a számítógéppel kapcsolatos fogalmak érthetőbben világítják meg ezt a kuszaságot. Az agy (*brain*) az a biológiai, anyagi hordozó (*hardware*) amin az elme (*mind*) fut operációs rendszerként (*software*). Egy tudatállapot, a tudat egy pillanata (*consciousness*) az elmének egy pillanatban fennálló állapota. A számítógépes példánál maradva: az operációs rendszer éppen milyen programokat futtat és ezek milyen feldolgozásokat végeznek számítógépünkben (agyunkban).

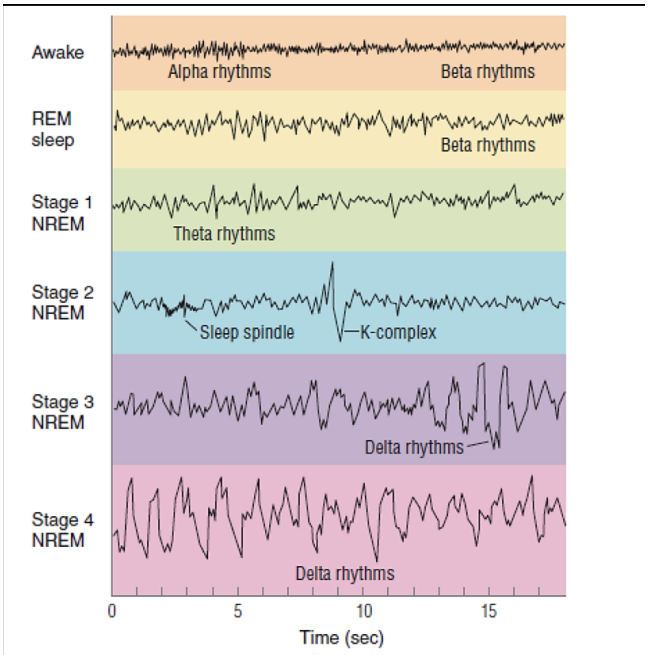
A többi fogalom annak kapcsán jön a képbe, hogy az agynak, és ezért a tudat működésének vannak szintjei, állapotai. Egy jól működő agy, elme **tudatos** (*conscious*) és egyben **éber** (*aware*) és **ébren van** (*awake*), azaz az agy érzékeli, érti a világot, reagál rá, gondolkodik. Emberben a tudat egy magasabb szintű állapottal az **éntudattal** (*self-consciousness*) is rendelkezik, azaz tisztában vagyunk azzal kik vagyunk, hol vagyunk, mit akarunk. Ez vélhetőleg az evolúciós törzsfán lefelé sétálva lassan eltűnik, és csak egy egyszerűsített tudat marad (még egy ideig, utána már valószínűleg csak ingerelhetőségről beszélünk). Az *aware(ness)* / **éber(ség)** fogalma azt írja le mennyire van agyunk tudatában a világnak, mennyire érzékeny, mennyire ingerelhető. Míg az angol az éber agyi állapotra az *aware* megenezést használja magyarul gyakran a **tudatos** kifejezést használjuk (nem összekeverendő a tudat vagy tudatosság elvontabb fogalmával). A másik fogalom az *awake(ness)*, ami azt jelenti nem alszik, azaz éber, de ezt elhasználtuk az aware esetére, pontosabb tehát az **ébrenléti szintet** vagy **ébren**-t használni. Az *alert(ness)* fogalma azt jelenti, hogy **figyel, felkészült** valamire. Magyarul erre is a már használt éber-t alkalmazzuk, de helyesebb talán **készültség**-et mondani. Az *attention* **figyelmet** jelent, szerencsére itt nincs kavarodás.



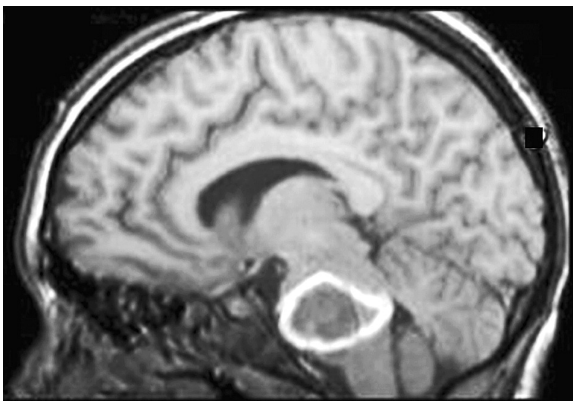
A fenti igen összetett Wenn diagram a lehetséges emberi agyi állapotokat (fekete keretek) és éberségi/tudati szinteket (narancs) mutatja, az agyi állapotokat az éberségnek megfelelően rendezve.

Az agy lehet felébredt (*awake*), amikor is tudatánál van (*aware and conscious*), de aludhat is különböző mélységben. Az alvás mélységének növekedésével (lassú hullámú alvás 1-2-3-4, majd gyors szemmozgásos alvás (REM)) nem csak az éberség, hanem a

tudatosság (*awareness*) is csökken, majd megszűnik. A tudat álmok formájában szűrődik be. Az altatók által kiváltott tudatállapotok nem egyeznek meg az normál alvás állapotaival és széles skálán változhatnak. Az egészséges tudatállapotokat módosíthatja meditáció, droghasználat vagy pszichózisok. Ezek mindegyikére, a normális agyműködésre és tudatállapotokra jellemző mintázatoktól eltérő agyi mintázatok és ezt kísérő megváltozott tudatélmények jellemzők, esetenként a tudatosság, ingerelhetőség is csökkenthet.



Az EEG jelek jól mutatják az agyi aktivitás szerveződését. Mélyülő alvás során a lassuló EEG azt jelzi, hogy az agyi állapotok lassabban kapcsolnak egymásba. Ezáltal a tudatosság nem tud kialakulni.



Locked-in szindrómás beteg károsodott kéreg alatti területe MRI képen

Agykárosodások esetén amikor az agyi területek egy része vagy a közöttük levő kapcsolatok időlegesen, vagy véglegesen károsodnak, az éntudat, tudat, tudatosság (éberség) fokozatosan eltűnhet. A *locked-in* (bezárt) szindrómában, melyet csak nemrég különítettek el a vegetatív állapottól fMRI vizsgálatok segítségével, a beteg tudata-éntudata teljesen ép, éber-tudatos, de mivel a középagyi területek károsodtak és mozgása bénult, semmiféle választ nem tud adni a külvilág ingereire. Csak agyi képalkotó mérések alapján, agyterületeinek aktivitását vizsgálva tudjuk, hogy gondolkodik és ezen területek aktivitását tudatosan változtatva képes nagyon egyszerű válaszokat adni. Amikor a középagyi-agytörzsi területek komolyabban károsodnak, a tudatosság-éberség csökken, az agyműködés szervezettsége leromlik. Amikor néha még megfigyelhető valamilyen szintű tudatosság-éberség (*awereness*), azaz a beteg bizonyos ingerekre reagál vagy spontán viselkedési jegyeket mutat, minimálisan tudatos állapotról beszélünk. Ennél komolyabb károsodások esetében kómáról, vagy vegetatív állapototról (újabban: válaszképtelen éber állapotról) beszélünk, amikor valamilyen szintű idegműködés megfigyelhető, de nem áll össze szervezett állapotba és az agy nem képes a testet működtetni. Az öntudatnak, viselkedésnek ilyenkor semmi jele, bár a vegetatív állapotban a beteg néha kinyitja a szemét. Az utolsó állapot az agyhalál, ilyenkor az idegsejtek sem mutatnak aktivitást és semmilyen mentális folyamat nem feltételezhető.

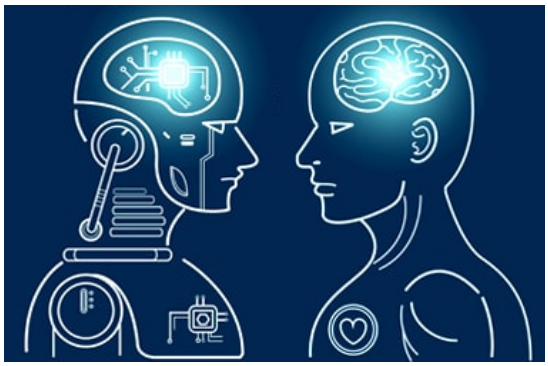
A következő bejegyzésekben a mesterség intelligencia is belép a képbe. Elő a kérdésekkel,

hogy legyen időm válaszolni rájuk.

Szerző: **Gulyás Attila**

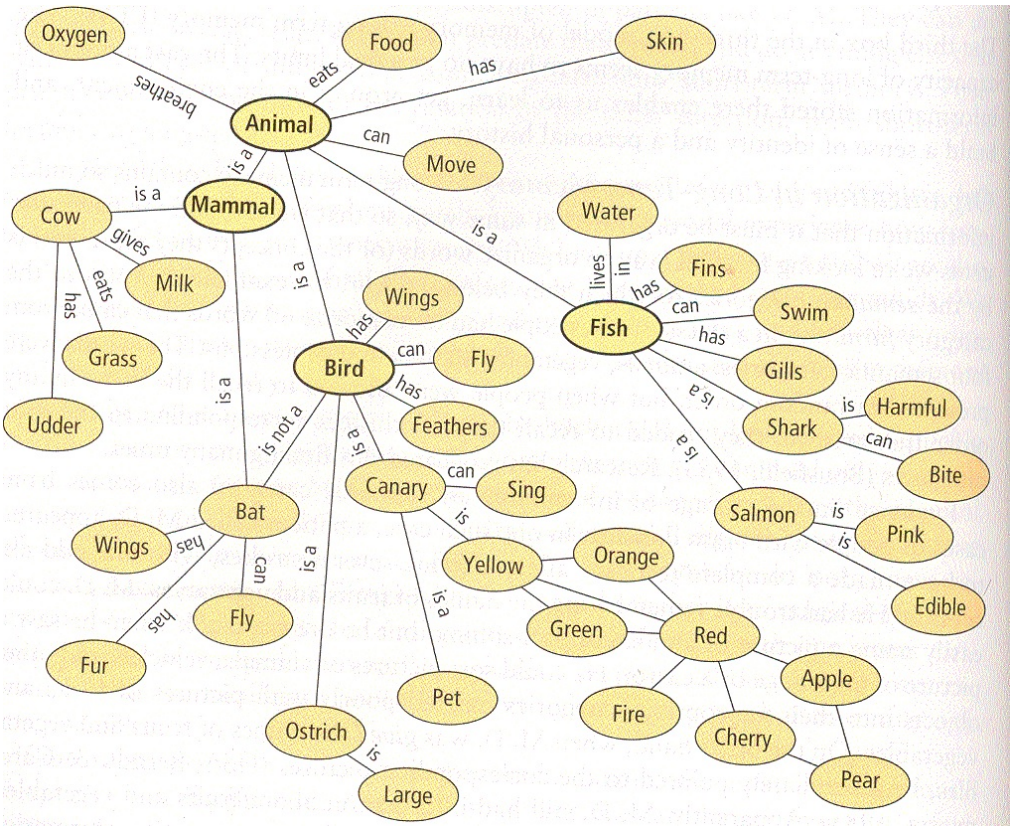
NI és AI, esetleg AGI: ki tudatos és ki intelligens?

Az utolsó két fogalom boncolgató bejegyzésben a természetes (natural=NI) és mesterséges (artficial=AI) intelligencia, valamint a tudattal kapcsolatos fogalmak viszonyát járjuk körül, belecsúszva a képzett találgatás és a filozófia határmezsgyéjébe. A természetest és a mesterségest kb. értjük, de eddig nem tárgyaltuk, hogy mi is az intelligencia?



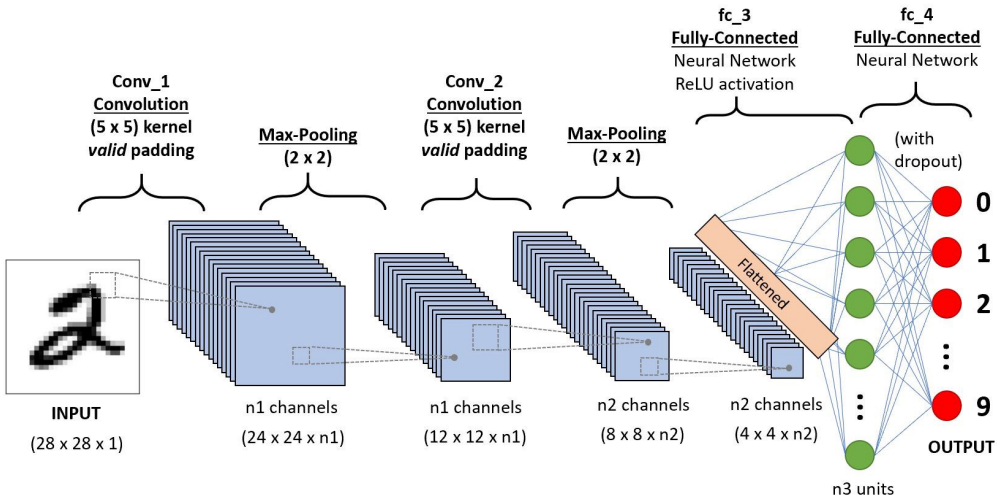
AI és NI rajz

A Wikipédia szerint az a képesség, hogy megszerezzünk, megértsünk és alkalmazzunk új információt, tanuljunk és tudásunkat problémák megoldására célzottan használjuk, vagy egy rendszer használja. A fogalom az 1900-as évek elején formálódó behaviorista pszichológia szóhasználatában jelent meg és a viselkedési vizsgálatokban mérhető feladatmegoldási komplexitást jelezte. A behavioristák, a behavior = viselkedés alapján igyekezték megérteni a viselkedést. Nem foglalkoztak a mentális reprezentációval, gondolatokkal, érzésekkel, csak a feladatra adott választ vizsgálták. Nagyjából mindent és mindenkit automataként próbáltak értelmezni. Éppen ezért épp elég volt nekik, hogy ahhoz, hogy valami intelligens legyen, nem szükséges a világ átélése a tudatosság. A fenti elvárásoknak viszonylag egyszerű rendszerek is eleget tudnak tenni, egy egyszerűen viselkedő állat (Skinner dobozában a billentyűket nyomogató patkány, igaz az már meglehetősen bonyolult) vagy egy elektromos kütyü (kapunyitó, automata lámpa). De az 1950-es években, a kibernetika, robotika és számítástechnika kialakulásakor a fogalmat a mesterséges (artificial) jelzővel megtoldva az ember által alkotott összetettebb rendszereket, mint mesterséges intelligencia (MI, angolul AI) azonosították vagy igyekeztek megalkotni. A több gyökerű AI céljai között szerepeltek: érvelés, problémamegoldás, tudás reprezentáció, tervezés és döntéshozás, tanulás, nyelvfeldolgozás, percepció (ingerek megértése), társas intelligencia és végül a Szent Grál, az általános intelligencia (AGI). A célok változatosságának köszönhetően és az akkori szerény lehetőségek okán mindenki a maga módján és módszereivel építkezett. Speciális programnyelvek keletkeztek (LISP, Prolog) melyek fogalmak hálózatát tudták reprezentálni, feldolgozni és megtanulni. Ezeket érvelés, tudásreprezentáció, döntéshozás, nyelvfeldolgozás terén használták.



Fogalmak szimbolikus reprezentációja. A hálózat csomópontjai a forgalmak, az összekötő élek viszonyulásuat jelentik.

Mások idegsejtekre hasonló elemekből fizikai vagy software-rendszereken alapuló mesterséges neuronhálózatokat építettek (perceptron, két vagy többrétegű back-propagation), hogy a percepciót (az ingerek feldolgozását) tanulmányozzák.



Neuronális reprezentáció. A fogalmakat a sejtek aktivitásának mintázata kódolja, mely aktivitás rétegről rétegre terjed, ez a feldolgozás.

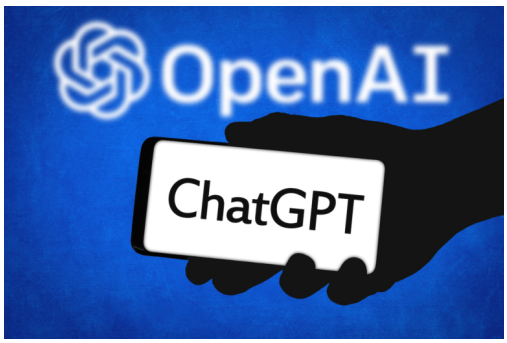
A két megközelítést szimbolikus (fogalmi/jel alapú) és neuronális (idegsejt alapú) megközelítésnek nevezik és mint előbb láttuk más reprezentációs alapokon nyugszik, de mind a kettő hálózatokkal dolgozik. Ez a kettősség még sokszor visszaköszön majd az #agyséta során. A szimbolikus esetben a hálózatok csomópontjai fogalmak, melyeket kapcsolatok kötnek össze, a neuronális esetben a sejtek működési mintázata jelent dolgokat

és a kapcsolatok alapján történik a mintázatok egymásba alakulása. A korai AI-t inkább a szimbolikus megközelítés jellemezte.

A kezdeti sikereket, a számítástechnika szerény képességei miatt, a 70es években egy hosszú megtorpanás követte, amikor is nem sok fejlődés történt, az AI lassan topogott előre. Ez egészen a 90es évek végéig tartott. A terméketlen időszakot „AI winternek", azaz az a MI telének hívták.

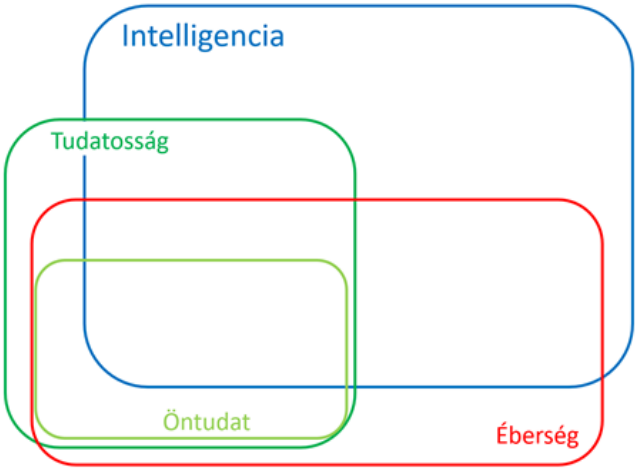
A gyors olvadást a számítástechnikai kapacitás növekedése és számos matematikai megközelítés (lineáris algebra, kalkulus, valószínűség elmélet, Markov láncok, gráfelmélet) finomítása, kidolgozása hozta el. De a legnagyobb lépés az volt, hogy visszanyúlva az idegtudományokhoz az AI kutatók rájöttek arra, hogy ha korábbi egyszerű kétrétegű hálózataikat az agyban az agyterületek között megfigyelt többszintű kapcsolatrendszerek szerint másodlagos hálózatokból álló hálózatokba kapcsolják (a következő szerveződési szintre lépnek), akkor meglepően hatékony, új tulajdonságokat mutató neuronális alapú AI rendszereket kapnak. Ennek első nagy sztárja a Deep Learning volt. Deep, azaz mély, mert a felépülő hálózatoknak sok egymásra épülő rétege volt. A mai LLM-ek 3-5 nagyságrenddel múlják fel korai elődeiket. Egy perceptron 2-3-talán 5 réteggel rendelkezett és információtartalmát néhány kB-ban lehetett mérni. Egy szakértői rendszer maximum néhány tíz-száz kB lehetett. Ezzel szemben a ChatGPT 3.0 (mára elavult) 600 réteggel és több TB információval rendelkezik. Itt is szépen látszik az emergencia, az elemek és szintek növelésével minőségileg új tulajdonságok jelentek meg.

Az elmúlt egy évben (2023 szeptembert írunk a bejegyzés elkészültekor) még a csapból is ChatGPT folyt (Tudatos-e a ChatGPT4.0? Mikor találják az írók, művészek és kutatók az utcán magukat?), egy ideje közbeszéd tárgya az önvezető autókkal kapcsos kibernetikai-etikai problémák (kit üssön el? két öreg nénit vagy egy terhes anyukát, ha választania kell) és készüljünk-e a robot apokalipszisra (Skynet és Terminátor) vagy fognak-e belőlünk iratkapcsot csinálni, az amúgy jóhiszemű gépek (paperclip problem)?



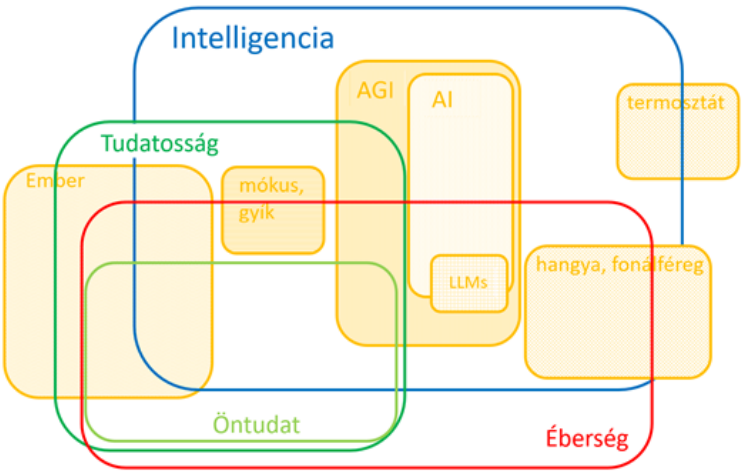
A ChatGPT és az OpenAI logói

Újabb Wenn diagramokon próbáltam meg ábrázolni, hogy a kérdések kapcsán felmerülő fogalmak hogyan fednek át és hogy ezeken a diagrammokon a tudatos és tudattalan agyak, rendszerek, az AI és az AGI hol helyezkedik el. Erre azért van szükség, mert az intelligencia, a tudatosság, én/öntudat és éberség/ingerelhetőség/válaszképesség egymástól részben független fogalmak.



A tudat, intelligencia és éberség viszonya

Hogy a tudat nem minden vagy semmi jellegű arról az előzőekben beszéltünk. Az emberi tudatnak vannak állapotai, mint ahogy a különböző méretű és felépítésű agyakkal rendelkező élőlényeknek is vannak tudatfokozatai, hiszen csak agyuk bonyolultságának függvényében képesek átélni a világot. Éppen ezért a tudatnak csak egy bizonyos szintjén és szervezettségénél jelenik meg az ön/én-tudat (világos zöld terület a sötéteb zöldön belül). Az intelligencia (kék terület) mindkettőtől független. Egy tudatossághoz nem kellően bonyolult rendszer (pl. egy hangya) is lehet intelligens a maga módján, hiszen információt szerez meg, tesz magáévá és alkalmazza (elnézést kérek a hangyától, ha megtagadnám tőle a tudatosságot, lehet inkább egy fonálféreggel és a maga háromszázvalahány idegsejtjével kellene példálóznom). De tudatos rendszerek is viselkedhetnek nem intelligens módon, bár vélem ritkán. Az éberség-ingerelhetőség (pirossal jelölve) megint független az előzőektől. Elképzelhetők olyan tudatállapotok, amik nem válaszolnak a külvilágra (alvó, vagy Pokemon Go-t játszó emberek :), vagy olyan, nem tudatos rendszer, amelyik reagál a külvilágra (papucsállatka, termosztát).
És most jön a találgatás. Helyezzük el a fenti diagramon az emberi és állati elméket, a mesterséges intelligenciát és annak legmodernebb, robbanásszerűen fejlődő kiterjesztését a Nagy Nyelvi Modelleket (LLMs, Large Language Modells, BERT, GPT, XLNet, ALBERT, stb), melyek az AGI = artificial general intelligence, azaz az általános mestersége intelligencia (rövidíthetnénk mondjuk ÁMI-nak, TÁS nélkül) felé mutató legígéretesebb próbálkozások.



A természetes és mesterséges rendszerek elhelyezése a fenti halmazokban.

Sokan taglalják, hogy a mostani ChatGPT 4.0 és egyéb LLMek vagy ezek későbbi változatainál megjelent-e, meg fog-e jelenni a tudatosság?
Ha valaki engem kérdez én azt mondom, hogy a ChatGPT 4.0 (nagyon nagy valószínűséggel) nem tudatos és még sok idő telik el addig amíg tudatosságot mutató AGI-okat készítünk. Ennek megfelelően is helyeztem el a diagramon. De miért? A témával foglalkozók egy része egyetért abban, hogy az ember tudatosságának fontos eleme, hogy egy testben élünk, melyet az evolúció formált érzővé és esendővé. Elménk kialakulásának fontos hajtóereje volt, hogy környezetünk és testünk minden rezdülése befolyásolja annak működését, érezzünk fájdalmat, örömet, szomorúságot, félelmet. Egy mérnökök által tervezett AGI ilyenekkel (egyelőre) nem rendelkezik.
Kérdés persze hogy ha rendelkezne, akkor tudatos lenne-e? De ez csak az első kérdés a számos elméleti, gyakorlati, filozófiai, etikai, morális és biztonsági kérdés közül, mely az AGI kapcsán felmerül. Néhányat itt körbejárok, de ha valakinek még marad kérdése, tegye fel bátran!

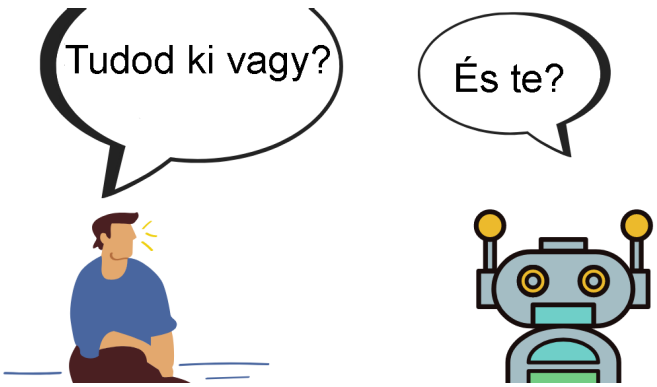
A fordított kérdést is feltehetjük: Kell-e tudatosság, hogy elérjük az AGIt? Az is kérdés, hogy hogy ez jó ötlet lenne-e? Nem lenne veszélyesebb-kiszámíthatatlanabb egy érzelmekkel, fájdalmakkal, félelmekkel, örömekkel bíró tudatos AGI, mint egy tudattalan, „testetlen”? Egy nagyobb léptékű kérdés, hogy az emberiség számára áldás vagy átok lesz-e az AGI?
Folyt. köv.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az AGI, a tudatosság és a jövő

Sok kérdést tettünk fel az előző bejegyzésben és nyilván sokat nem. Néhányat most körbejárunk.

Lehet-e tudatos egy AGI?
Agykutatóként számomra a legfontosabb kérdés: Egy megfelelően beágyazott AGI tudatos lesz-e vagy nem?



A robo visszakérdez

Az egy mellékkérdés persze, hogy erről hogyan győződhetünk meg? Hiszen én még arról se tudok meggyőződni, hogy egy másik embernek tudata van? Csak abból gondolom, hogy igen, hogy a magaméról tudok és feltételezem egy hasonló ember nem zombi, aki helyesen válaszol a kérdésekre csak épp nem tudatos. Ebben a kérdésben a Turing teszt se nagyon segít. Amin mellesleg szerintem egy átlagember szintjén a ChatGPT átmenne, ha óvatosan nem készítették volna fel, hogy az ilyen kérdésekre korrektül be kell vallani, hogy „én csak egy nyelvi modell vagyok, ami nem rendelkezik tudatossággal”.

A kérdés körbejárását ne filozófiával, hanem evolúcióbiológiával indítsuk. Ugye a

természetes szelekciónál az a nyerő, akinek több utódja van, vélhetőleg azért, mert hatékonyabba tudja megérteni és előre jelezni és ezért kihasználni környezetét és fajtársait. Az teljesen egyértelmű, hogy egy magasan összetett intelligens rendszer mindezt hatékonyabban tudja csinálni, mint egy buta (bár az amőbák is köszönik jól el vannak 2 milliárd éve). Azaz evolúciós nyomás van minél intelligensebb rendszerek kialakulására. A belső élmény, a világ megélésének, a tudatosságnak a kialakulásának közmegegyezés szerint az az evolúciós előnye, hogy jelentősen növeli a rendszer hatékonyságát. A tudatosságba került (átélt) objektumok minden tulajdonsága egyértelműen előhívódik és azonnal összekapcsolható más objektumok tulajdonságaival. Ezáltal hatékonyabban lehet velük dolgozni. Persze annak indoklása, hogy a tudatosság miért jó még nem magyarázza meg annak működését és magát a tudatos élményt sem (lásd kváliák kérdése). Ez a gondolatmenet azt sugallja, hogy egy kellően bonyolult mesterséges rendszerben is kialakulhat a tudatosság, azaz majd az AGI-ban is.

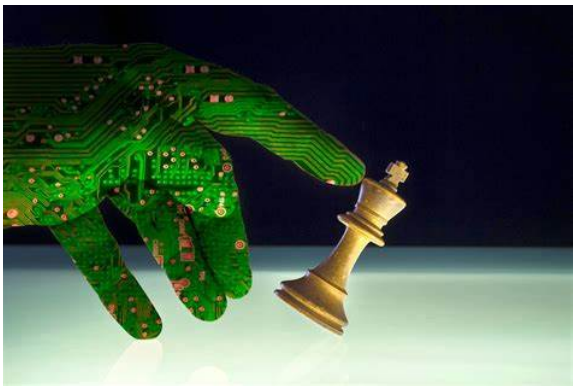


Az Agymanók rajzfilm érzelmeket megszemélyesítő szereplői

A kérdés azért fennáll, hogy vajon mennyire lesz ez hasonló az emberi tudatossághoz? Az emberi tudatosságnak egyik meghatározó eleme, hogy a környezetünk érzékelésén kívül érzékeljük testünket és belső állapotainkat, korábbi életünk emlékeire színezik mindezt. Az evolúciós küzdelemben, hogy túléljünk olyan rendszereink fejlődtek (amigdala, nucleus accumbens) amik meglehetősen erősen jelzik számunkra, hogy testünknek mi a jó és mi a rossz, lásd fájdalom és gyönyör. Mindenhez, amit érzékelünk és átélünk egy minősítés csatolódik, mely alapvetően meghatározza viszonyulásunkat és ezáltal cselekedeteinket (lásd az Agymanók című remek, gyerekeknek-felnőtteknek egyaránt való animációs filmet). Agykérgünk bizonyos területei pedig annak feldolgozásával foglalkoznak, hogy testünk milyen helyzetben van, mi vesz körül, meddig tart testünk határa. És ehhez jönnek még agyunkba zsinórozott, ösztönös félelmeink és vonzódásaink a régmúltból. Ezeket őseinktől örököltünk, mivel segítették túlélésüket, de mára már esetleg megalapozatlan hajtóerőkként maradtak csak meg (félelem a sötéttől, pókoktól, az újdonságoktól, együnk meg annyit amennyit csak tudunk, öljük meg a szomszéd törzs embereit, mert kevés a táplálék). Gondoljuk át, milyen lenne tudatunk, ha mindezeket kivonnánk (talán ez a meditációban elért megvilágosodás?)? Egy testetlen, félelmektől mentes AGI ezekkel mind nem rendelkezik, ezért kérdéses tudatossága milyen lenne.

Építsünk-e tudatos AGI-t? Tartsunk-e a robot apokalipszistől?

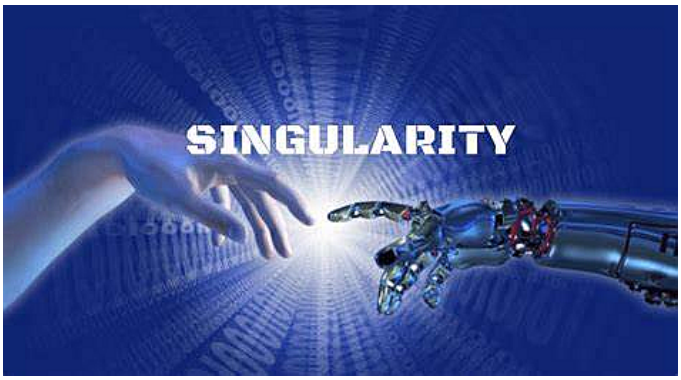
Elsőre jó ötletnek tűnik, hogy az AGI, amit építünk minél jobban hasonlítson ránk, mert esetleg ezáltal hatékonyabb lesz kialakuló tudata. Ha azonban a második kérdést is hozzávesszük a dologhoz, okunk lesz az óvatosságra. Képzeljünk csak el egy önjáró autót, ami (először akit írtam :)) rettegni kezd amikor kifogyóban a benzin, vagy elkoptak a gumik, és mindent megtesz saját épségének megőrzésére? Amíg robotjainkba nem építünk ilyeneket, talán nem lesz olyan erős késztetésük arra, hogy versenyre lépjenek velünk és legyűrjenek minket. Sokak szerint az AI-t és AGI-t szerszámnak kell tekinteni, nem kell



Kiüt-e minket az AI?

tudatosnak lennie, érzelmekkel és a többi csingilingivel. Persze mindezen beépített „érzelmek" és „ösztönök" nélkül is fordulhat számunkra veszélyessé a helyzet. Egy gondoltkísérletben arra jutottak a filozófusok, hogyha arra programozzuk az AI-okat, hogy a lehető legtöbb iratkapcsot gyártsák az emberiség boldogulása végett, előállhat az az eset, hogy elfogy a vas a földön és mivel az emberi vérben vas található a teljesen jóhiszemű és a dolgokat nem teljesen átlátó AI, az emberek véréből is vasat fog kivonni, ezzel elpusztítva azokat. Ez egy elég szélsőséges eset, de célkeresztbe hozta a „human- AI alignment" fogalmát. Azaz, hogy úgy kell létrehozni az AI rendszereket, hogy azok tisztában legyenek az emberek és az emberiség értékeivel, céljaival és saját céljaikat ehhez igazítsák (alignmet=igazítás). Sokan dolgoznak is ezen a kérdésen és nem lennék meglepve, ha hamarosan megjelennének az AGI pszichológusok és pszichiáterek.

Hallgatva a podcastokat (Lex Fridman, Sean Carrol) és olvasva a véleményeket az elme és AGI kutatás élvonalában álló, meghatározó kutatók, üzletemberek, filozófusok nagyjából fele-fele arányban lelkesednek vagy tartanak az AGI lehetőségétől. Egyesek apokalipszist, mások földi paradicsomot kiáltanak. Legtöbbjük véleménye pedig az, hogy mint minden emberi találmánnyal, ezzel is óvatosan kell bánni és hogy igazából nem az AGI-al lesz a baj (lásd a kés, a dinamit és az atomenergia esetét), hanem az azt használó emberekkel. Számomra Elon Musk és még sokan mások hozzáállása áll közel. Ő azt mondja, hogy AGI létrehozása is egy mérnöki munka. Mint ahogy tudtunk és tudunk biztonságos gőzgépeket, repülőket, darukat, űrhajókat, autókat és szerszámgépeket készíteni, melyek nem okoznak kárt a felhasználókban, ugyanúgy megfelelően tervezett és hatóságok által szabályozott (lásd légügyi, közlekedési, élelmiszeri és egyéb felügyeleti hatóságok) AGI-ok kialakítása a járható út.



Singularity rajza.

Van azonban egy jelentős különbség a korábbi rendszerek és az AGI között. A korábbi rendszerek nem voltak képesek önmaguk fejlesztésére, az AGI pedig igen. Exponenciális, robbanás-szerű, hihetetlen gyors változás indulhat meg az AGI fejlődésében, mert képes lehet magát fejleszteni. Egyesek szerint napok alatt bekövetkezhet így az emberi gondolkodást elképzelhetetlen módon felülmúló rendszerek kialakulása. Ezt a technológiai robbanást nvezik *singularity*-nek, azaz szingularitásnak. De miért is? Ez a fogalom a matematikából, fizikából jött. Amikor egy rendszert leíró egyenletek egy pontban végtelen értéket vesznek fel (például az anyag sűrűsége a fekete lukban) azt hívják szingularitásnak és mivel matematikailag kezelhetetlen gondokat okoz. De hogy jön ez ide? Hát úgy hogy a világegyetem 14.3 milliárd éve keletkezett, a földi élet 3.8 milliárd éve, az eukarióták 1 milliárd éve, az emlősök 160 millió éve, a főemlősök 12 millió éve, a Homosapiens 200 ezer éve, írott

kutlturánk 5000 éve, iparunk 400 éve, számítógépeink 70éve, az internet 25 éve. Azaz egyre rövidebb az idő a világot megváltoztató technológiák megjelenésének. Eljön az a pont amikor minden végtelenül gyorsan fog változni és megjósolhatatlanná válik.

Éppen ezért, 2023 márciusában, a ChatGPT megjelenése kapcsán több mint ezer meghatározó személyiség (szakember, cégvezető) nyílt levelet írt, miszerint arra kérik az AI-t fejlesztő cégeket, hogy függesszék fel munkájukat 6 hónapra és gondolják át milyen biztonsági és etikai kérdéseket kell körbejárni, milyen szabályozásokat kell hozni ahhoz, hogy az emberiség békésen élhessen együtt a hamarosan felbukkanó AGI-okkal. Ilyesmire volt már példa a géntechnológiai forradalom kezdetén. Hasonló önmérséklettel leültek a szakember, végiggondolták a lehetséges veszélyeket (szuper vírusok, elszabaduló rezisztencia gének) és kidolgoztak biztonsági rendszereket.



A világot lefedő multinacionális cégek a Földön

Záró megjegyzésként, egy furcsa, de igaz gondolat. A minap beszélgettem egy ismerősömmel a mesterséges intelligencia eljöveteléről és veszélyeiről. Azt mondta nem érti miért aggódunk hiszen ez már 40 éve bekövetkezett, amikor kialakultak a világgazdaságot irányító hatalmas nemzetközi vállalatok (mondhatukn akár 423 évet is amikor is a Kelet-Indiai Társaságot bejegyzték). A bonyolult felépítésű, egymásba fonódó szervezetek irányításában részt vevő egyedi emberek, mind a szervezeti leírásban meghatározott módon végzik munkájukat, döntenek, irányítanak. Egyikük sem akarja, hogy feléljük a Föld erőforrásait, szegénységet okozzunk a fejlődő országokban, munkanélküliséget a fejlett országokban és egészségtelen szeméttel etessük gyerekeinket. A végeredmény mégis az, hogy a Shell, az Exxon, az Amazon, a Volkswagen, a Pfizer, a Nestlé, a Tesco és még sok más óriáscég működésének az eredményeként melegszik a Föld, pusztul a természet, elhízottak vagyunk stb. A szervezetek mesterségesek és intelligensek, a bürökrácia elburjánzásai. Mint ahogy egy modern neuronális alapú AI rendszerben sem köthető egyetlen mesterséges idegsejthez sem a döntés és a végkimenetel, egy óriáscég bürokratáinak egyike sem tehető egyénileg felelőssé a cég döntéseiben és viselkedésében.

Az örvényféreg meséje I: hogyan készül egy modell állat?

Az első évadban megismerkedtünk a természetes szelekció darwini mechanizmusával, mely lehetővé teszi bonyolult biológiai szerkezetek kialakulását, a szerveződési szintek és az emergencia fogalmával, mely segít megérteni, hogyan épülnek fel bonyolult összetett rendszerek, valamint a homeosztázis fogalmával, melynek kapcsán megismerkedtünk azzal, hogy az egyre bonyolódó idegrendszerek milyen módon képesek segíteni az állatok túlélését a reflex, a döntés, a modell és gondolkodás képességével.

Első lépésként azt a szintlépést tettük meg, hogy a molekulából álló idegsejtek hogyan összegzik a rájuk érkező jeleket, majd továbbítják azokat. A következő lépéssel **tovább emelkedünk a szerveződési szinteken és megvizsgáljuk, hogyan alakulnak ki az idegsejthálózatok az idegsejtek kölcsönhatásából, és ezek a hálózatok mire képesek.**

Most is egy tanmesével kezdjük a hálózatokkal való ismerkedést. Egy személyes történettel,

mely azt mutatja be, hogy egy egyszerű idegsejt hálózat hogyan képes egy összetett feladat leképzésére és megoldására, illetve, hogy az agy és a számítógép feladatmegoldási módja miben tér el.

A programozás korábbi szenvedélyem volt, mint az agykutatás. Már középiskolás koromban szert tettem egy Commodore 64-esre, aminek kemény 50valahány kByte BASIC-ben vagy Assembly-ben programozható memóriája volt. Később, amikor biológushallgatóként csatlakoztam a SOTE Anatómiai Intézetében a Szentágothai János vezette kutatólaboratóriumhoz első hivatalos projektem egy macska látókérgében elektrofiziológusok által megjelölt nagy-kosársejt (a gátlósejtek egyik fajtája) 3D rekonstrukciója volt. Igazi dinoszauruszt használtunk hozzá. Egy egész szobát elfoglaló PDP-11-es számítógépet (vagy valami olyasmit), melynek még monitora sem volt, hanem papírra nyomtatta a válaszokat. Másfél araszos floppy lemezekről boot-olt és fűtött, mint egy kazán.



C64-es fényképe



PDP-11-es számítógép képe

Egyik első hobbi projektemben pedig, egy élőlény viselkedését próbáltam meg BASIC nyelven leprogramozni. Hozzáfértem egy akkor vadonatúj csúcstechnológiának, ma ősinek számító korai Macintos-hoz, 1984ből, ez súlyra század annyit nyomott, mint az öreg PDP és kb. annyit tudott. Ezen kezdtem el idegsejtekkel és élőlényekkel kapcsolatos programozási játékaimat. Ezek nem tartoztak szorosan a macska látókéreg idegsejtjeinek kutatásához, mely szakdolgozati témám volt, de sokat tanultam belőlük.
A kutatók modelleket alkotnak, hogy a valóságot egy viszonylag érthető, egyszerűbb (csökkentett számú változóval, paraméterrel leírható) rendszerben vizsgálják. Fontos egy modellnél tisztázni mit tart meg és mit vet el a valóságból, milyen kérdésekre kérdezhet és kérdez rá? Biológus révén tisztában voltam a feladat léptékével, ezért egy viszonylag egyszerű élőlény, a gyors folyású patakokban a kövek alatt élő, csinos, két fekete szemfoltot viselő örvényféreg (Planaria, a biológusok sokat vizsgált modell állata) viselkedését és

döntéseit próbáltam meg egy egyszerű modellben megragadni.



Örvényféreg fényképe

Leszűkítettem az állatkát érő lehetséges külső és belső ingereket, és hasonlóan szűkítettem a lehetséges viselkedések körét. Virtuális jószágunk érzékelte a külvilág ingereit: **fényt, hőmérsékletet, tápanyagot, ragadozó vagy szexuális partner jelenlété**t, illetve saját belső állapotát: **éhes** vagy **álmos**-e? Viselkedésében választhatta azt, hogy **aludjon, táplálkozzon, meneküljön vagy párosodjon**.



Macintosh számítógép 1984ből

Ezek után nekiláttam, hogy klasszikus számítógép kódolással modellezzem a döntéseit. A klasszikus programozási nyelvek csak egy szálon futnak, egymás után hajtva végre döntéseket és utasításokat. Egy döntés logikailag megfogalmazva valahogy így néz ki:

Ha A igaz akkor csináld EZT, ha nem akkor AZT

a modell féreg esetében pl egy döntés:

ha RAGADOZÓ akkor MENEKÜLÉS különben TÁPLÁLKOZÁS

programnyelven (itt most nem az ősi BASIC-et, hanem a modernebb, és általam legtöbbet használt PASCAL nyelvet használom):

```
if (RAGADOZÓ>0) then MENEKÜLÉS else TÁPLÁLKOZÁS;
```

Mindeddig nem is volt baj, hanem amikor egy többtényezős döntést próbáltam meg programozni, akkor elszabadult a kombinatorikai pokol. Például amikor hideg van és sötét akkor az állatka inkább táplálkozik vagy alszik, mintsem szaporodásba fogjon, ami amúgy, ha melege van, süt a nap és jóllakott abszolút elsőbbséget élvez. Egy ilyen döntést igen megrázó leprogramozni, valahogy így nézne ki:

```
if ((HŐMÉRSÉKLET<0) and (FÉNY<10)) then
  ESZIK;
else if (PARTNER>0) then
  PÁRZIK;
else if (RAGADOZO>0) then
  MENEKUL;
  else
    ALSZIK;
else
  ALSZIK;
```

De itt még nem gondoltunk arra, hogy mi van, ha meleg van, de sötét vagy fordítva és ha közben megéhezik, vagy álmos lesz?

Hát ezt újra végig kell gondolni. Hogy ezt elősegítsem készítettem egy táblázatot, amelynek soraiban az ingerek, oszlopaiban az egyes lehetséges viselkedések vannak.

	Menekül	Táplálkozik	Alszik	Párzik
Ragadozó				
Táplálék				
Fény				
Szexuális partner				
Hőmérséklet				
Éhes				
Álmos				

Ezt a táblázatot kell kitölteni számokkal melyek mutatják, hogy az adott inger (sor) milyen hatással van a lehetséges válaszra (oszlop). Az első sor kitöltése egyszerű, ha jön a ragadozó akkor menekülés (nagy pozitív érték) és minden más viselkedés nem váltódik ki (értéke nulla)

	Menekül	Táplálkozik	Alszik	Párzik
Ragadozó	10	0	0	0
Táplálék				
Fény				
Szexuális partner				
Hőmérséklet				
Éhes				
Álmos				

Utána már kicsit nehezebb a helyzet, de viszonylag jól lehet rangsort adni az egyes ingerek viselkedésre gyakorolt hatásának. A végleges táblázat valahogy így nézne ki.

	Menekül	Táplálkozik	Alszik	Párzik
Ragadozó	**10**	0	0	0
Táplálék	0	**5**	0	0
Fény	0	3	0	5
Szexuális partner	0	0	0	**8**
Hőmérséklet	0	3	0	3
Éhes	0	**4**	0	0
Álmos	0	0	4	0

A legegyértelműbb, erős hatásokat kövérrel jelöltem, először ezeket írtam be a táblázatba, majd kitöltöttem a többi értéket. A 0 azt jelenti, hogy az adott inger nem befolyásolja az adott válaszreakciót.

Hogyan kell kiértékelni egy ilyen táblázatot? Azaz a döntés hogyan történik? Először, (a) Mindegyik ingerhez hozzárendelünk egy a környezet vagy a belső állapotnak megfelelő értékét, ez lehet 0/1 vagy 0-10, legyen itt most 0/1. Ezek után (b) minden táblázatelem értékét megszorozzuk az adott sorra beállított inger értékkel. Majd, (c) a kapott számokat oszloponként összeadjuk, végül (d) kiválasztjuk a legmagasabb összegű viselkedést és az állatka azt fogja csinálni.

		Menekül	Táplálkozik	Alszik	Párzik
Ragadozó	**1**	**10**	0	0	0
Táplálék	1	0	**5**	0	0
Fény		0	3	0	5
Szexuális partner	1	0	0	0	**8**
Hőmérséklet		0	3	0	3
Éhes	1	0	**4**	0	0
Álmos	1	0	0	4	0
Válasz		**10**	5	0	8

Válasz ragadozó esetén

		Menekül	Táplálkozik	Alszik	Párzik
Ragadozó	**0**	**10**	0	0	0
Táplálék	1	0	**5**	0	0
Fény	1	0	3	0	5
Szexuális partner	1	0	0	0	**8**
Hőmérséklet		0	3	0	3
Éhes	1	0	**4**	0	0
Álmos	0	0	0	4	0
Válasz		0	13	0	**16**

Válasz pár esetén

A táblázatot nézegetve hamar beláttam, hogy sokkal egyszerűbb az adott ingerek alapján kiértékelni melyik viselkedés mekkora értéket kap az adott helyzetben és ezt a viselkedést választani eredményke, semmint a többtényezős döntést logikai fával leírni, soronként végrehajtott programmal. Ez igen kényelmetlen és egy bizonyos bonyolultsági szint fölött lehetetlen megoldás.

Azt, hogy hogyan kell leprogramozni egy ilyen táblázat kiértékelését és hogy ennek mi köze az idegrendszerhez és a gondolkodáshoz a következő bejegyzésből tudjátok meg.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az örvényféreg meséje II: Hogyan dönt az idegrendszer?

Láttuk, hogy egy sokelemű döntést úgy tűnik egyszerűbb egy inger-válasz táblázattal leírni, mint a számítógépek sorokból álló kódjával.
A táblázatot használva egyszerű számolással kiszámolható, hogy adott esetben hogyan is kell viselkedni. A feladat jól programozható, a kitöltött döntési tábla és az aktuális ingermintázat alapján. Össze kell adni oszloponként a soronként érkező ingerek értékével beszorzott válasz-erősség elemek értékeit, majd a legnagyobb értékű viselkedést kell

végrehajtani.

Kód alakban ez így néz ki:

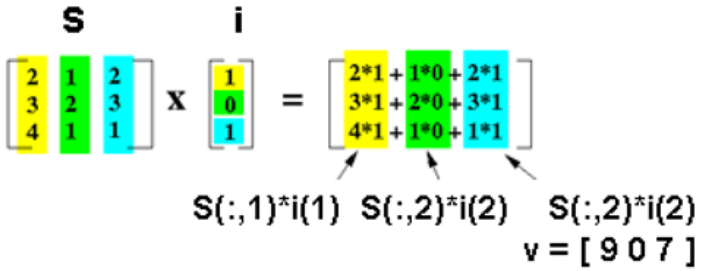
```
for i:=1 to 4 do begin                  //vegyük az összes oszlopot
  VÁLASZ[i]:=0;
  for j:=1 to 7 do                      //vegyük az összes sort
        //szorozzuk össze az összes ingert a súlyokkal és adjuk hozzá a válaszhoz
    VÁLASZ[i]:=VÁLASZ[i]+INGER[j]*VISELKEDÉS[j,i];
end;
MITTEGYÜNK:=0;
for j:=1 to 6 do                        //keressük meg a legerősebb választ
 if VÁLASZ[j]>MITTEGYÜNK then MITTEGYÜNK:=VÁLASZ[j];
```

Az INGER 7 elemű változó tartalmazza az egyes ingerek 0/1 értékét (jelen vannak-e), a VISELKEDÉS 4x7es táblázata a súlyokat (ez maga a döntést megalapozó táblázatunk). A 4 elemű VÁLASZ változóba kerül az eredmény, ennek a legmagasabb értékét keressük meg és a rekeszének számát tesszük a MITTEGYÜNK változóba. Ennek értékét fogjuk megvalósítani.

Ez a megoldás jelentősen egyszerűbb és átláthatóbb, mint a ki tudja milyen módon hatalmasra növekvő. elágazó, ***HA-AKKOR (IF-THEN)*** elemekből álló döntési fa. Igaz, lehet, hogy kicsit lassabb a végrehajtása, mint egy jól megírt döntési fának. De ez gyakran van így a számítástechnikában. Valami lehet gyors, de sok helyet foglal a memóriában, vagy lehet egy kis memória igényű, tömör leírás, de sokáig tart.

Aki gimnáziumban vagy később matek órán hallott már a vektorokról és a mátrixokról (itt most nem a filmről és a belőle készült paródiáról beszélünk), sőt esetleg dolgozott is velük, egyből láthatja, hogy a feladatot ilyen alakban is meg lehet fogalmazni és az egyik legegyszerűbb mátrix művelettel kiértékelni.

A vektorok és mátrixok fogalmát és műveleteik leírását a matematikusok a XIX-XX század fordulóján dolgozták ki a lineáris algebra keretében, ma már sok középiskolában tananyag. Egy **m x n** es mátrix egy **m** sorból és **n** oszlopból álló táblázat. Egy vektor pedig egy egyetlen sorból, vagy oszlopból álló mátrix (táblázat). A köztük levő lehetséges műveletek megfelelő mintázatban végrehajtott szorzások és összeadások. Feladatunk megoldásához a táblázatot, mely egy mátrix, jobbról kell szorozni az inger értékekből alkotott oszlopvektorral. Eredményként az egyes válaszok erősségét kapjuk egy sorvektor alakjában. Ezután már csak meg kell keresni a vektor legnagyobb elemét és azt a viselkedést kell végrehajtani.



A kapcsolatmátrixot megszorozva az inger vektorral előáll a válasz vektor

S X i = v (a válasz vektort (mintázatot) **v** megkapjuk ha a súly mátrixot **S** megszorozzuk az inger **i** vektorral)

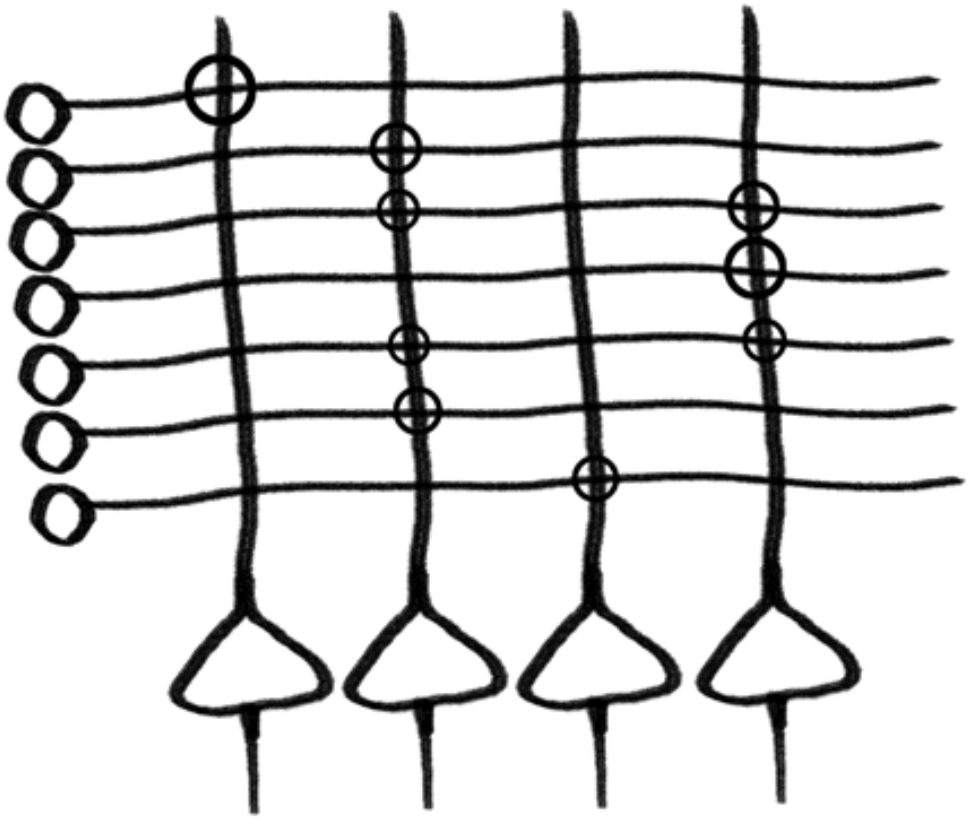
Persze míg ez a program készült én szorgalmasan merültem el az agykutatásban, melynek során megismerkedtem az idegsejtek szerkezetével és működésével. Közben az egyetemen, állatszervezettan óráinkon és gyakorlatainkon tanultuk, hogyan alakult ki és fejlődött az idegrendszer a csalánozóktól az emlősökig. Nem volt nehéz összeraknom -amit az elméleti

kutatók már évtizedekkel korábban összeraktak (de én még nem olvastam munkáikat), hogy **egy egyszerű idegsejthálózat praktikusan a fenti táblázat kiértékelését végzi el.**

De hogyan is?

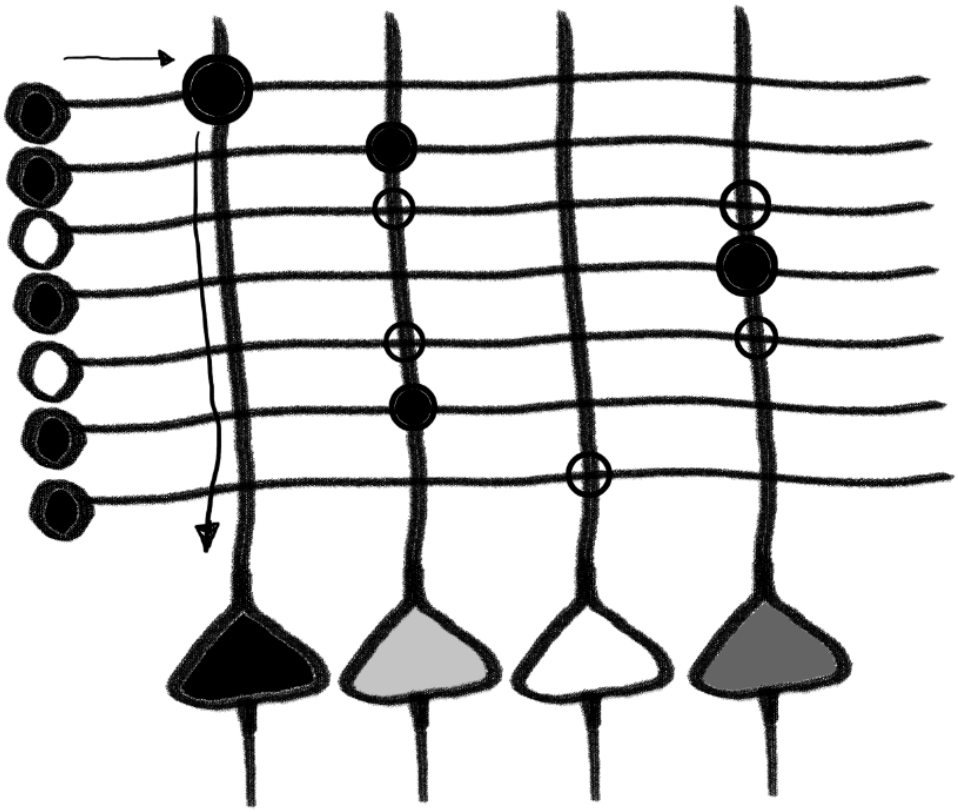
Az idegsejtek működését leíró kötetben megismerkedtünk azzal, hogy az idegsejtekre hogyan érkezik az ingerület, hogyan adódik össze számos bemenet, és hogyan aktiválódik egy sejt. Röviden: egy idegsejt elágazó axonján elektromosan terjedő ingerület minden egyes axonvégtalpnál ingerületátvivő anyagot önt a célsejttel közösen kialakított szinapszisba. Az axont adó sejt típusától függ, hogy milyen átvivőanyag szabadul fel és ez milyen hatást vált ki a célsejt nyúlványán. Serkentő sejt esetében a célsejt aktivitása növekszik és ha ez eléri az aktiválási küszöböt a sejt aktív lesz, axonján továbbadja az ingert. Eddig csak egyszerű reflexet kialakító, sorban egymás után kapcsolt idegsejtekről beszéltünk. Most az a feladatunk, hogy több irányból beérkező ingerek több lehetséges választ váltsanak ki.

Ha mindegyik ingertípushoz egy-egy érzékelő (receptor) sejtet, minden válaszhoz pedig egy-egy mozgató (effektor) sejtet rendelünk, meg is vannak táblázatunk sorai és oszlopai. A táblázat elemei pedig a sejtek között alkotott szinapszisok és ezek erőssége. Minden egyes receptorsejt vízszintesen futó axonja kapcsolatot alkot minden egyes mozgató sejt függőlegesen futó dendritjével. Kész is az első neuronhálózat! Az axonok és dendritek egy rácsháló pontjaiban találkoznak és szinapszisokat alkotnak. Lerajzolva valahogy így néz ki:



A háromszögletű motoros sejtek dendritje felfelé, axonja lefelé fut, ők alkotják az oszlopokat. Az érzéksejtek (körök bal oldalon) axonja vízszintesen fut és keresztezi a motor sejtek dendritjeit. A kereszteződésben a körök mérete a kapcsolatok (szinapszisok) erősségét jelzi (a fenti táblázat alapján).

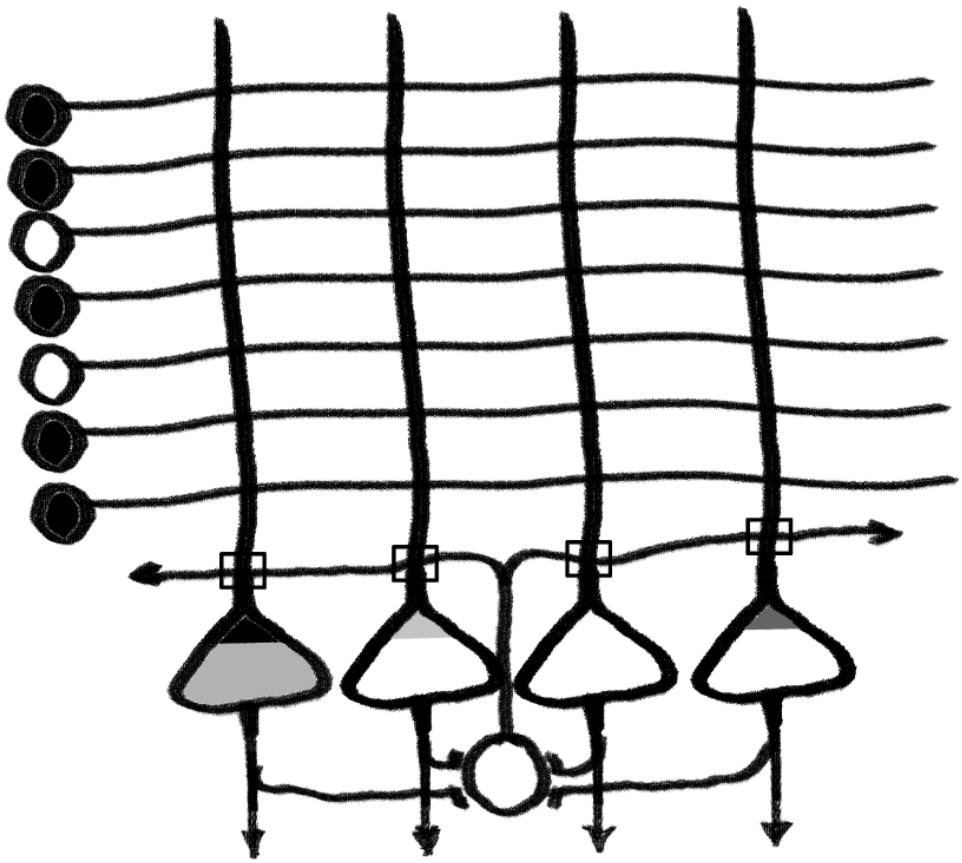
Hogyan alakul ki a válasz (döntés) egy ilyen hálózatban? Mi a kiértékelés folyamata? Ugye, az egyszerű reflex esetében a mozgató sejt egyetlen bemenetet kapott, amit a beérkező szinapszison keresztül aktivált az érzékelő sejt. Ebben az esetben minden egyes mozgató sejt 7 eltérő erősségű serkentő szinapszist kap a 7 érzéksejttől. Az egyes szinapszisok által kiváltott jelek (áramok) összeadódnak (előjelesen) és ez lesz az adott mozgató sejt ingerületi állapota. Ugye 4 lehetséges mozgató idegsejtünk van, mindegyik 7 bemenettel, azaz 28 szinapszis van a hálózatban, amennyi elem a táblázatban.



Amikor az érzéksejtek egy része jelet kap és bekapcsol (satírozva), axonjaikon végigszalad az inger (vízszintes nyíl) és aktiválja a szinapszisokat (satírozott körök). A jeleket a sejtek dendritjein a sejtestre terjednek (függőleges nyilak), a sejtek a rájuk érkező bemenetek függvényében bekapcsolnak (a szürke különböző árnyalatai).

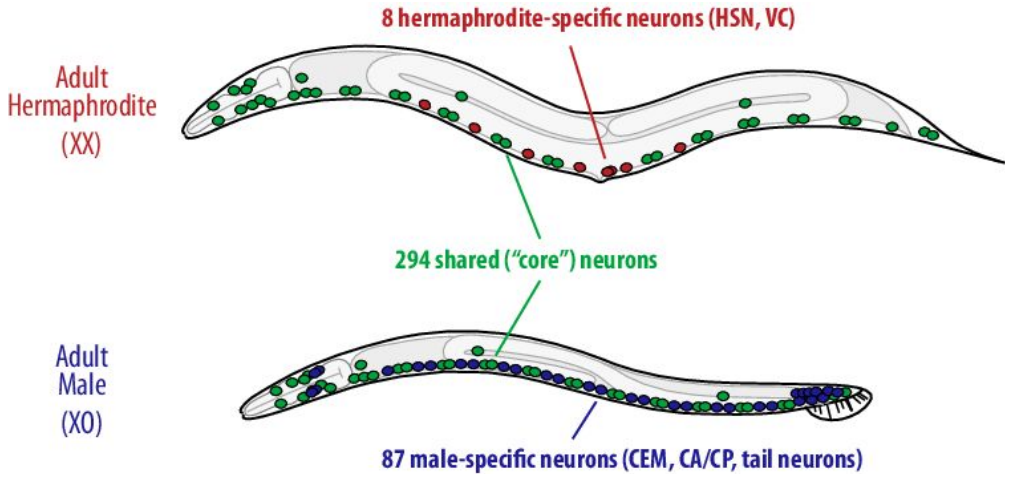
A fenti inger mintázatra tehát a mozgató sejtek közül a Menekülés aktiválódott a legjobban. De mi van a többi mozgató sejt aktivitásával? Egyszerre nem lehet többfajta viselkedést kivitelezni, mert baj lesz belőle (nem tudunk egyszerre sétálni és úszni), azaz egyszerre csak egy sejt lehet aktív. Matematikailag vagy programozással könnyű kivitelezni azt a feladatot, hogy keressük meg a legaktívabb elemet és az lesz a válasz. Szerencsére az idegsejtek is könnyen végre tudják hajtani ezt a műveletet. Az idegrendszer működésének vizsgálói igen korán leírták a szomszéd-gátlás (lateral inhibition) jelenségét. Már Descartes és kortársai felfigyeltek az idegrendszeri gátló folyamatokra, de pontosabban Ernst Mach írta le a látórendszer esetében, hogy ha egy agyterület működésbe lép, általában gátolja a közelében lévő területeket. Ideghálózataink ezt úgy oldották meg, hogy az evolúció során kialakultak olyan idegsejtek, gátlósejtek, amely csökkentik, gátolják a körülöttük levő sejtek aktivitását. Hatásukat a fenti táblázatba negatív előjellel építenénk be.

A legaktívabb sejt kiválasztására alkalmas hálózathoz hozzá kell még tennünk még egy gátlósejtet amelyik mindegyik sejttől megkapja a bemenetet és így érzékeli a kimenet erősségét. A gátlósejt mindegyik serkentő sejtet ugyanannyival gátolja.



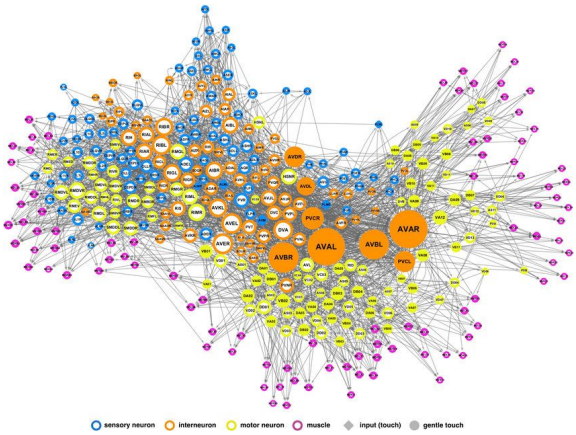
A kerek sejttesttel jelölt gátlósejt mindegyik motorossejttől kap jelet és mindegyikre ad gátlást. A gátlás eredményeként minden motoros sejt aktivitása uyganolyan mértékben csökken, így csak a legaktívabb vált ki választ. A gátlás előtti és utáni sejtaktivitást a motoros sejtek felső és alsó színezése szemlélteti.

Így csak a legaktívabb aktivitása marad meg. csak a legerősebben hajtott sejt esetében marad pozitív a serkentés értéke. Azaz, eléri az jelkibocsájtás küszöbét és kiváltja a megfelelő mozgást.Voila!!!: **Csak néhány megfelelően elrendezett idegsejt és viszonylag bonyolult döntéseket is képes megoldani egy élőlény. Ez a második lépés az idegrendszer kialakulásában. Követi az első lépést, az ingerek érzékelésére, vezetésére és az izmok mozgatására alkalmas egyszerű reflexek kialakulását. Eddig csak gépszerűen reflexesen válaszolt az idegrendszer, most már egyszerű döntést is tud hozni.**



A különböző nemű fonálférgek idegsejtjei

A fejlődésbiológusok kedvenc modellállata egy apró fonálféreg a Coenorhabditis elegans. Kis helyen elfér, nem kér sokat enni, és mivel nagyon rövid idő alatt ivarérett, rengeteg generációja fejlődik rövid idő alatt. Nagy előnye még hogy átlátszó. Így a fejlődésbiológusok az élő, fejlődő állat összes sejtjét meg tudják figyelni. A kutatók arra a megrázó megállapításra jutottak, hogy gyakorlatilag minden egyed 959 sejtből áll (Anon, 2022), ebből meglepően sok: 302 idegsejt (Hobert, 2018). A 302 idegsejt minden egyedben ugyanazokat a kapcsolatokat alkotja, és az állatkák ugyanazokat a viselkedési mintákat mutatják. Nem véletlen, hiszen a hálózat működését leíró táblázat elemeinek erősségét a természetes kiválasztódás genetikusan meghatározza. A férgecskék hasonló helyzetekben hasonlóan döntenek, viselkednek, hiszen őseiknek ez a megoldás vált be. A nem ritkán előforduló mutáns egyedekben hiányozhatnak egyes idegsejtek vagy kapcsolatok és emiatt megváltozik viselkedésük. Segítségükkel a kutatók feltérképezték, hogy az egyes sejtek milyen viselkedésekben játszanak szerepet.



A fonálféregben azonosított idegsejtek kapcsolatrendszere

A fonálféreg emutatja, hogy **egy évmilliók alatt jól hangolt, bár merev idegsejthálózat, remekül tud egy ösztönös viselkedésmintázatot végrehajtani abban a környezetben, amiben kialakult**. Azonban minden helyzetben ugyanúgy dönt, viselkedése merev. A merev válaszok, ösztönök nem tudnak alkalmazkodni a körülmények változásához. Ez felvet egy komoly problémát: Hogyan lehet alkalmazkodni?



Hogy ezt a problémát hogyan oldotta meg az idegrendszer azt majd a harmadik mese kutyája és Pavlov mutatja majd be egy későbbi bejegyzésben. De előtte még terítékre kerül a párhuzamos és soros feldolgozás problematikájának megbeszélése, mert ennek a két fogalomnak a viszonya nagyon fontos lesz a tudatos gondolkodás kialakulásában!

Kutya és a csengő

Szerző: **Gulyás Attila**

A kutya meséje: a tanulás feltalálása

Az "Örvényféreg meséjének" második bejegyzésében láttuk, hogy egy hálózatba genetikusan rögzült szinaptikus súlyok hogyan képesek viszonylag bonyolult helyzetekben is megfelelő, „ösztönös" válaszokkal reagálni a környezet kihívására. Az élőlények egyik alapreflexe a visszahúzódási reflex, ha valamilyen káros, és ezért fájdalmasnak érzékelt inger ér egy élőlényt, akkor visszahúzódik, vagy visszahúzza csápját, tapogatóját, végtagját, amelyikkel az ingert érzékelte. Ez igen gyors reakció, hiszen csak egy érzéksejt és egy mozgatósejt elég hozzá.



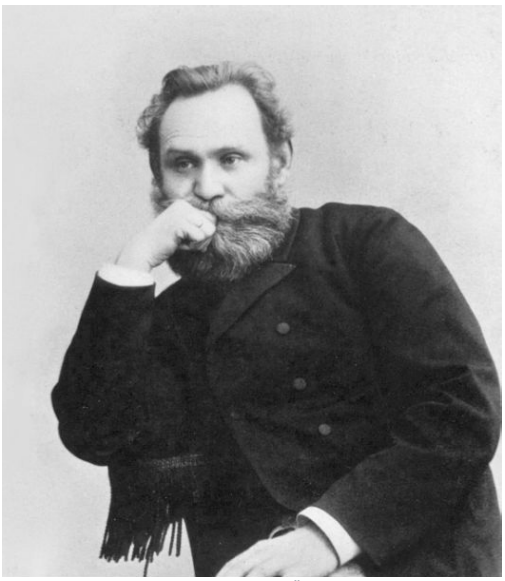
A visszahajló szedertüske arról győz meg minket, hogy érdemes flülbírálni azt a reflexünket hogy visszarántsuk a kezünket.

De jó-e az, hogy minden fájdalmas esetben visszarántjuk kezünket, lábunkat? Aki nyúlt vagy lépett már szederbokorba, és megszúrta a tüske tudja, hogy nem jó ötlet mindig reflex-szerűen visszakapni kezünket, hiszen akkor a visszahajló tüske csak még mélyebbre fúródhat a bőrünkbe. Egy drágább példa: képzeljük el, hogy nagymamánk megkér, a család féltett kincseként őrzött levesestálat vigyük a konyhából az ebédlő asztalra. Sajnos Nagyi a tűzforró levest merte bele, és ahogy visszük elkezdi egyre jobban égetni a kezünket. Nyilván legyűrjük a reflexet és legalább a legközelebbi bútorig szaladunk vele letesszük, nem pedig elhajítjuk.

A két példából érezhető, hogy a merev idegrendszeri válaszok egy ideig hasznosak, de egy idő után gondokhoz vezetnek, nem elegek. Az evolúció során hasonló „érvek" szóltak a mellett, hogy az élőlények válaszai ne merevek, hanem módosíthatók legyenek, az idegsejtek kapcsolatai ne előre meghatározottak, hanem változtathatók legyenek. Hogyan is oldotta meg ezt a természet? Az **asszociatív tanulási szabály**al.

Ezzel már biztos találkozott mindenki, ha nem is ilyen formában kimondva. Pavlov kutyájáról van szó. Mond valamit?
A komoly arcszőrzettel rendelkező Ivan Pavlov, akit ma bármaly hipster helyen szívesen látnk, orosz élettanászként 1904-ben kapott Nobel díjat az emésztés élettanának vizsgálatáért. Számos megfigyelése közül számunkra a feltételes reflex leírása fontos. Mi is

ez?
„A nyál összefut a számban" mondást járta körül Pavlov, aki kutyákat használt kísérleti alanyokként. Mint ahogy nekünk összefut a nyálunk amikor megpillantunk egy ízletesnek ígérkező ételt, vagy megérezzük annak illatát, a kutyáknak is elkezd folyni a nyála, ha megérzik vagy meglátják az ételt. Mivel ez mindig - azaz feltétlenül - bekövetkezik, ezért az illat a feltétlen inger és a nyálelválasztás a feltétlen válasz. Pavlov miközben az emésztés rejtelmeit vizsgálta megfigyelte, hogy számos esetben a kutya nyála máskor is megindul. Az ember agya (különösen a kutatóké) ugye mindig összefüggéseket keres, nagyon érzékeny a korrelációkra, időbeli összefüggésekre (erről majd bőven lesz szó később). Hamar rá is jött az összefüggéseket kereső agyával -

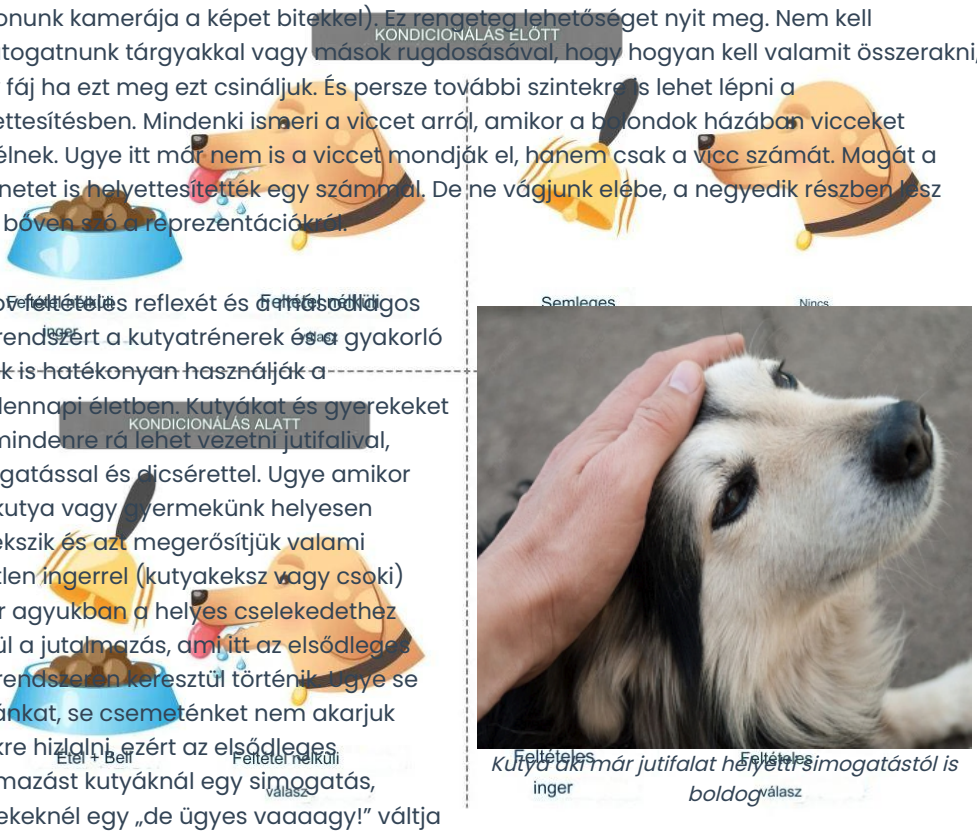

Ivan Petrovics Pavlov és az Ő hipster arcszőrzete


Cirkuszi állatidomár az állatvédlem korszaka ellőtről

amire már a vásári állatidomárok és állattartó gazdák évezredek óta rájöttek -, hogy az állatok agya is érzékeny két inger időbeli együttállására.
Gyerekkoromban onnan tudtam, hogy édesanyám hamarosan hazaérkezik a munkából, hogy tengerimalacaink elkezdtek visítani. Az állatkák meghallották amikor a 300 méterre levő buszmegállóban édesanyám leszáll és dohányos köhögésével elindul hazafelé. Még öt perc volt hátra mire hazaért, de ők már visítoztak örömükben, mert megtanulták, hogy ez a távoli zaj hamarosan salátalevelet, répát vagy káposztatorzsát eredményez.
Pavlov ezt a jelenséget formalizálta, boncolta fel és pontosította kísérlettel. Keresett egy ingert, ami a kutyáknál nem váltott ki alapban nyálelválasztást. Ez esetében csengőszó volt. Kiinduláskor, ha húst mutogatott a kutyáknak (feltétlen inger) az ebek nyálzottak (feltételen válasz). Ha csengetett akkor nem nyálzottak. Azonban, ha nem sokkal a csengőszó után húst mutogatott (oda is adta a kutyáknak) akkor néhány alkalom (társítás) után az állatok már akkor elkezdtek nyáladzani amikor a csengőszót meghallották, hús már nem is kellett a nyáladzáshoz. Mivel a csengőszóra való nyáladzásnak kezdetben (de később már nem) feltétele volt a hús is, ezért azt az ingert (csengőszó) feltételes ingernek nevezte el és az általa kiváltott választ feltételes reflexnek.

A XIX-XX század fordulóján a kutatók – lévén az emberi tudáshalmaz még jelentősen kisebb volt – még megengedhették maguknak, hogy széleseb látókörben gondolkodjanak. Pavlov a feltételes reflexből levont következtetéseit a nyelvre is kiterjesztette és kialakította az első és második jelzőrendszer fogalmait. Az ember a környezetből és a belső ingerek megszerzésére érzékszerveit, az elsődleges jelzőrendszert használja. A második, kifinomultabb jelzőrendszer a nyelvet és a fogalmakat használja arra, hogy az elsődleges jelzőrendszer ingereit leírja, helyettesítse, reprezentálja. Ugye ez egy nagyon fontos

gondolat, valami valóst, konkrétat egy elvont, virtuális dologgal helyettesítünk (mint ahogy telefonunk kamerája a képet bitekkel). Ez rengeteg lehetőséget nyit meg. Nem kell elmutogatnunk tárgyakkal vagy mások rugdosásával, hogy hogyan kell valamit összerakni, vagy fáj ha ezt meg ezt csináljuk. És persze további szintekre is lehet lépni a helyettesítésben. Mindenki ismeri a viccet arról, amikor a bolondok házában vicceket mesélnek. Ugye itt már nem is a viccet mondják el, hanem csak a vicc számát. Magát a történetet is helyettesítették egy számmal. De ne vágjunk elébe, a negyedik részben lesz még bőven szó a reprezentációkról.



A Pavlovi társításos tanulás négy fázisa.

Pavlov feltételes reflexét és a másodlagos jelzőrendszert a kutyatrénerek és a gyakorló szülők is hatékonyan használják a mindennapi életben. Kutyákat és gyerekeket sok mindenre rá lehet vezetni jutifalival, simogatással és dicsérettel. Ugye amikor egy kutya vagy gyermekünk helyesen cselekszik és azt megerősítjük valami feltétlen ingerrel (kutyakeksz vagy csoki) akkor agyukban a helyes cselekedethez rögzül a jutalmazás, ami itt az elsődleges jelzőrendszeren keresztül történik. Ugye se kutyánkat, se csemeténket nem akarjuk kerekre hizlalni, ezért az elsődleges jutalmazást kutyáknál egy simogatás, gyerekeknél egy „de ügyes vaaaagy!" váltja le. Ugye ez a csere is feltételes reflexen keresztül történi. A jutifalival egyidőben megpaskoljuk a kutyát, csemeténknek meg fennhangon lelkesedünk, miközben ölelgetjük, így egy idő után a dicséret is hasonló jutalomnak számít. [Megjegyzendő, bár vélem mindenki tudja, hogy a főemlősöknél (és kisebb mértékben a kutyáknál is) fontos az érintés, tehát már egy ölelés vagy simogatás is elsődleges jutalmazó, csak sokszor a jutifali/csoki egyszerűbb, illetve apróbb sikerek jelzésére tartogatjuk.]

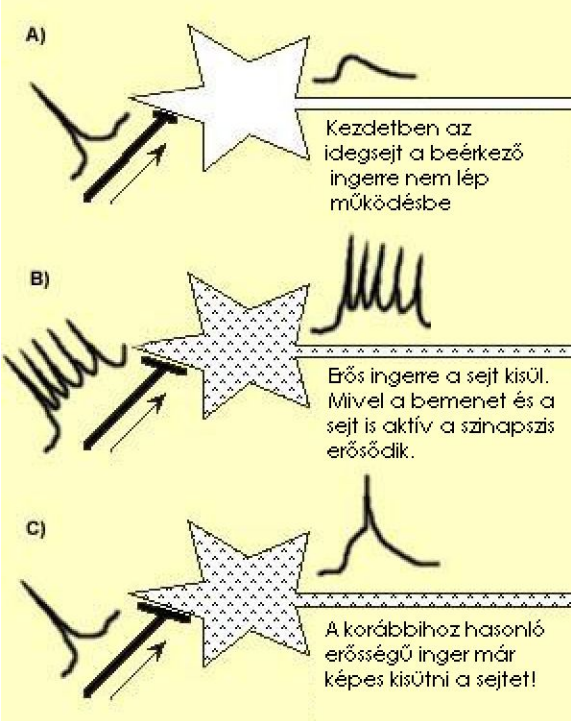
Kutya aki már jutifalat helyettesítő simogatástól is boldog



Hebb fényképe

A következő nagy lépést Donald O. Hebb kanadai pszichológus tette meg. Ő a neurobiológia, azaz az agyműködés sejtszintű értelmezése és a pszichológia, azaz a viselkedés és gondolkodás értelmezése közötti híd, a neuropszichológia egyik megteremtője. A neuropszichológia azt a nézőpontot alapozza meg, hogy mentális folyamatainkat (gondolkodásunk, érzelmeink, döntéseink) az agyban lejátszódó fizikai folyamatok okozzák, azaz a tudat az agyműködés eredménye. Ezzel ugye elveti a dualisták nézőpontját (én is, én is…) miszerint az elme és az agy két független dolog. Hebb mind kutatóként, mind tanárként figyelemreméltó örökséget hagyott maga után. Gimnazista korom meghatározó olvasmánya volt 1949-ben megjelent műve: The Organization of Behavior, mely magyar fordításban: A pszichológia alapkérdései címmel számos kiadásban jelent meg. Mindenkinek ajánlom, hogy merüljön el benne. Számunkra itt és most fontos, hogy részben a Pavlovi eredmények, részben saját tapasztalatai alapján, megfogalmazta a tanulás általános szabályát, melyet azóta, mint Hebb szabály ismerünk:

„Amikor A sejt axonja elég közel van B sejthez ahhoz, hogy azt gerjessze, és ismételten vagy tartósan részt vesz annak aktiválásában, akkor az egyik vagy mindkét sejtben valamilyen növekedési folyamat, vagy anyagcsere-változás megy végbe, melynek hatására A hatékonyabban lesz képes a számos bemenet közül arra, hogy B sejtet aktiválja."



A Hebb mechanizmus lépései: A) Kezdetben az idegsejt a beérkező ingerre nem lép működésbe. B) Erős ingerre a sejt kisül. Mivel a bemenet és a sejt is aktív a szinapszis erősödik. C) A korábbihoz hasonló erősségű inger már képes kisütni a sejtet!

Igazából ezt a szabályt az agyműködés számos szintjén meg lehet figyelni: Ha két agyi egység időben egyszerre aktív akkor a közöttük levő kapcsolat megerősödik és hatékonyabban váltják ki egymás aktiválódását. Ezek az egységek lehetnek: két fogalom, két viselkedés, két agyterület vagy ahogy ez kiderült a folyamatok alapjául szolgáló két idegsejt. Szerintem ez az agyműködésnek egy olyan alapvető alap mechanizmusa, mint Darwin természetes kiválasztódási mechanizmusa. Hebb felismeréséért érdemelt volna egy Nobel díjat, de sajnos nem kapta meg.

Hogy Hebb javasolt anyagcsere változása mi is azt a kutatók csak egy évtizeddel később tudták elkezdeni vizsgálni, amikor már rendelkezésükre álltak a molekuláris szintű vizsgálódások módszerei.

Erről a következő bejegyzésben a tengerinyúl és a csikóhal meséjében lesz szó.

Szerző: **Gulyás Attila**

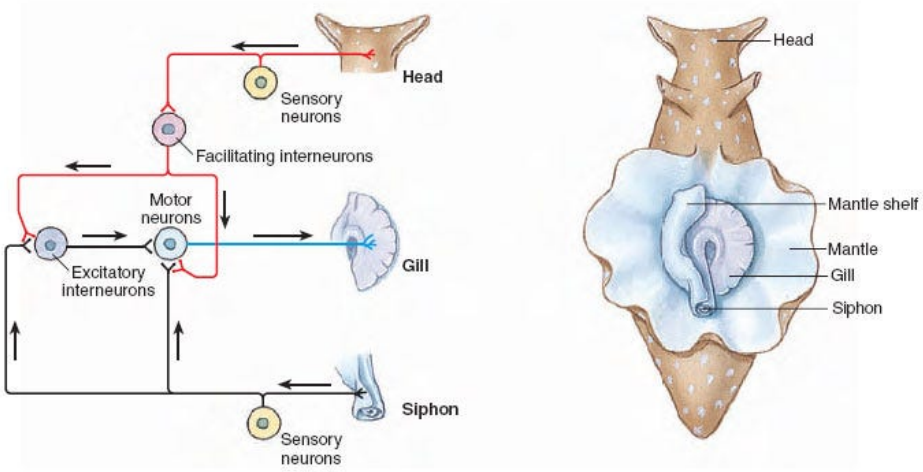
A tengerinyúl és a csikóhal története: a tanulás útjai

A tanulás mechanizmusának egyik első modell állata az Aplysia nevű házatlan tengeri csiga (magyarul tengeri nyúl) volt. Az Aplysia a testén kívül lebegteti igen érzékeny kopoltyúit és szívócsövét, melyekre nagyon kell vigyáznia. Ha megzavarják visszarántja ezeket testébe, hogy megvédje életfontosságú szerveit.



Tengeri nyúl fényképe

A kutatók észrevették, hogy ezt a reflexet bizonyos ingerekkel erősíteni vagy gyengíteni lehet, azaz az ösztönös visszahúzásválasz tanítható. De ez még nem egy társításos (asszociatív) tanulás, ahol az időbeli egybeesés alapján tanul az állat, hanem nem-társított tanulás, ahol csak meghatározott ingerek képesek módosítani a válasz erősségét. A gerinctelenekre jellemző, hogy idegrendszerük viszonylag kevés és genetikailag jól meghatározott helyzetű sejtből áll. A tengeri nyúlban is pontosan lehetett tudni melyek azok a sejtek, akik a reflexben és annak hangolásában (modulálásában) részt vesznek és milyen szinaptikus kapcsolatokat alkotnak. Eric Kandel és csoportja ezért rajtuk vizsgálta a tanulás szinaptikus mechanizmusát a 70es évek elején. Munkájáért 2000-ben Orvosi Nobel díjat kapott.



Jobboldalt a tenger nyúl anatómiája, baloldalt a kopoltyúvisszahúzó reflexben szerepet játszó idegsejthálózat rajza. A reflexet a motoros idegsejtre érkező piros gátló és fekete serkentő bemenetek erősségének változása modulálja.

6 mozgató idegsejt vesz részt a kopoltyú visszahúzásában. Ha az érintést érzékelő idegsejtet aktiválják akkor erős ingert ad szinapszisán keresztül a mozgató idegsejtre és az parancsot ad a kopoltyút visszahúzó izmoknak, hogy csomagolják össze a kopoltyút. Ha sok gyenge inger érkezik az érzéksejtre akkor az fokozatosan egyre kevesebb ingerületátvivő anyagot szabadít fel a mozgatósejtre és ennek válasza is csökken. Ennek a folyamatnak a molekuláris lépéseit is sikerült Kandel-éknak felderítenie.

A következő nagy, és igazából végleges nekifutás az asszociatív tanulás eseménysorozatának felderítésére Terje Lømo és Tim Bliss eredményeivel kezdődött, nagyjából a tengeri nyúl kísérletekkel egyidőben. Ők elektrofiziológusok voltak, azaz az idegsejtek elektromos jeleit vizsgálták finom mikroelektródák segítségével. Vizsgálati modellként patkány agyának hippokampusz nevű részéből készített, megfelelő módon életben tartott szeleteket használtak (én is hasonló szeleteken dolgoztam, hasonló módszerekkel). A hippokampusz agyunk azon része, ahol memóriánk kialakul és

segítségével tárolódnak el a memórianyomok agykérgünk egyes területein. Nevét a tengeri csikóról kapta, mert alakja a tengeri csikó alakjához hasonló kunkorokat mutat.



Baloldat kibontott hippokampusz, jobboldalt egy tengeri csikó látható.

Nem az összes tanulási formáért felelős (erről majd később) de remek terület a memórianyomok tárolásának felderítéséhez.

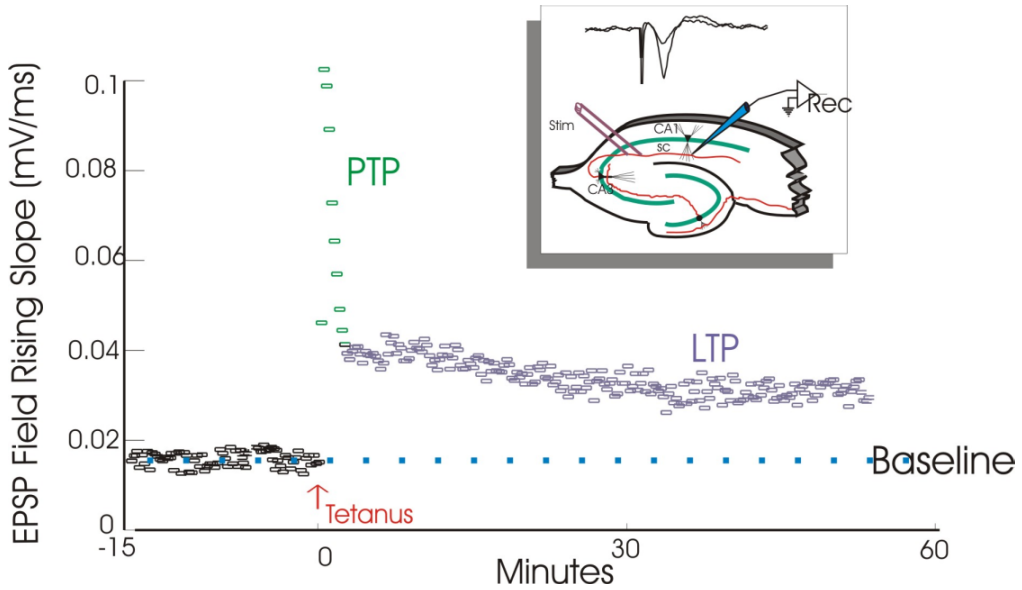


In vitro agyszelet az elvezető kamrában, mikroszkóp alatt. Jobboldalt a mikromanipulátorban elhelyezett mérő üvegelektróda látható. Baloldalt a szeletek életben tartásához szükséges tápoldatot áramoltató cső.

A kísérlet során a hippokampusz egyik területén nézték meg azt, hogy egy bemenő pálya ingerlésével mekkora válasz váltható ki az itt található sejteken. Azt találták, hogyha a pályát gyengén ingerlik, viszonylag nagy időközönként, akkor a kiváltot válasz erőssége hosszú ideig ugyanaz marad. Ha azonban sokkal nagyobb gyakorisággal (frekvenciával) vagy néhányszor nagyon erősen aktiválják a bemenetet akkor a sejtek válasza megnő, és ami fontos a kiváltott válasz hosszú ideig (órákig) erősebb marad. Ezt az alapmegfigyelést és rendszert azután közel 25 éven keresztül vizsgálták és működését molekulák kölcsönhatásának szintjén sikerült megérteni. Praktikusan azt találták amit Pavlov, csak nem elvont fogalmak mint feltétlen és feltételes inger, hanem az idegsejtek szintjén:

> **HA** egy idegsejtre érkező **bemenet aktív** (az axonterminális aktiválódik és belőle serkentő ingerületátvivő anyag szabadul fel) **ÉS** ugyanekkor a bemenetet kapó **idegsejt is aktív** (membránpotenciálja depolarizálódott), **AKKOR** a két elem közötti **szinapszis hatékonysága megnő** (nagyobb szinaptikus áram folyik rajta keresztül, ami erősebben serkenti a sejtet) és hosszú ideig úgy is marad.

A jelenséget long-term potentiationnek, **LTP**-nek, azaz hosszantartó erősödésnek nevezték el.



A Bliss-Lomo kísérlet. Jobb fölső sarokban a hippokampusz szeletben elhelyezett ingerlő elektróda (dupla) és mérő elektróda (kúpos) elhelyezkedése látható, valamint felette a kiváltott válaszok. A gyenge alapvonali válasz a tetanikus (nagyfrekvenciás) ingerlést követően átmenetileg erősen megmő (PTP, zöld), majd 1-2 perccel később részben visszaesik egy tartósan megnövekedett szintre (LTP, szürke).

Ez egy asszociatív (társításos) tanulási mechanizmus. HA a bemenet aktív ÉS ugyanakkor a sejt is aktív AKKOR a kettő közötti kapcsolat erőssége megnő, azaz a későbbiekben ez a bemenet a sejtet akkor is hatékonyan aktiválja amikor az éppen nem aktív. Idővel azt is bizonyították, hogy a mechanizmus nem csak asszociatív, hanem arra is érzékeny melyik bemeneten keresztül történik a tanulás. Azaz, ha a sejtünk két bemenetet is kap (A és B), akkor az A bemeneten társítással kiváltott hatékonyság növekedés a B bemeneten nem jelenik meg és fordítva. Ez biztosítja az új információ pontos tárolását.

Valamivel később a folyamat fordítottját is leírták és LTD-nek (long-termdepression-nek), azaz hosszútávú csökkenésnek nevezték el. Ez akkor következik be, amikor a bemenet és a sejt kisülése NEM korrelál egymással.

Az eredmény tehát praktikusan feltárta a Hebb szabály sejtszintű mechanizmusait. Ennek technikai részleteiről a következő #agyséta bejegyzés szól majd.

Szerző: **Gulyás Attila**

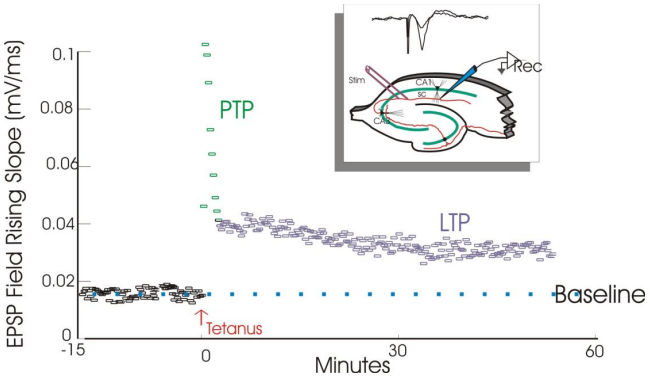
Technikai: A Hebb szabály molekuláris mechanizmusai

Mi is történt a Lømo és Bliss kísérletben? Egy, a memória kialakulásában fontos szerepet játszó agyterületből, a hippokampuszból vágtak ki a kutatók egy szeletet patkány agyából. Ezt a kb. fél milliméter vastag és 4x4 milliméter méretű szeletet egy apró kis kamrában, a megfelelő hőmérséklet, oxigéntartalom és tápanyagellátás biztosításával közel fél napig életben lehet tartani. Az idegsejtek továbbra is ketyegnek és beszélgetnek egymással és az agyszeletben megközelíthetők finom hegyű üvegelektródákkal, hogy elektromos aktivitásuk követhető legyen.



In vitro agyszelet az elvezető kamrában, mikroszkóp alatt. Jobboldalt a mikromanipulátorban elhelyezett mérő üvegelektróda látható. Baloldalt a szeletek életben tartásához szükséges tápoldatot áramoltató cső.

A kísérletben a hippokampusz CA1 nevű területén található piramissejtek (a területre jellemző serkentő sejtek) aktivitását mérték, miközben a rájuk érkező pályarendszert, a magyar neuroanatómus Schaffer Károly által leírt, Schaffer kollaterálisokat (egy másik terület a CA3 piramissejtjeinek axonjait) ingerelték elektromosan.



A Bliss-Lomo kísérlet. Részletekért lásd az idevonatkozó korábbi bejegyzést.

Kezdeti kísérleteikben a sejtek nagy csoportjának aktivitását figyelték meg EEG elektródával és a kiváltott serkentő potenciál (populációs excitatory postsynaptic potential, EPSP) meredekségét mérték. A mechanizmus felderítésének majd 25 éve alatt a mérésket egy idő után már egyedi idegsejtekből sejten belülre helyezett (intracelluláris) elektródával mérték. Ez kicsit trükkösebb feladat, de erősebb jelet ad és lehetőség van a sejtműködés megfelelő befolyásolására is.
Ritka és gyenge impulzusok megmérték a válasz nagyságát (ez a teszt stimulálás), melynek mérete állandónak bizonyult. Egy nagy frekvenciás vagy erős ingerlést követően, a kiváltott válasz nagysága (amplitúdója) a korábbi tesztimpulzus hatásához képest többszörösére (4-5x) nőtt, majd viszonylag hamar lecsengett, de tartósan 1,5-2 szerese maradt az eredeti

válaszerősségnek. A korai, átmeneti erős fázist post-tetanic potentiation-nek (PPT), azaz tetanikus ingerlést követő erősödésnek hívják. A második fázist és az egész folyamatot LTP-nek nevezik (lásd fentebb). A tartós hatás a szelet esetében 1 óra volt (tovább nem lehet fenntartani a preparátumot), de később ugyanezen az agyterületen élő, viselkedő állatban is elvégezték a kísérletet, és napok, hetek múlva is megmaradt a változás.

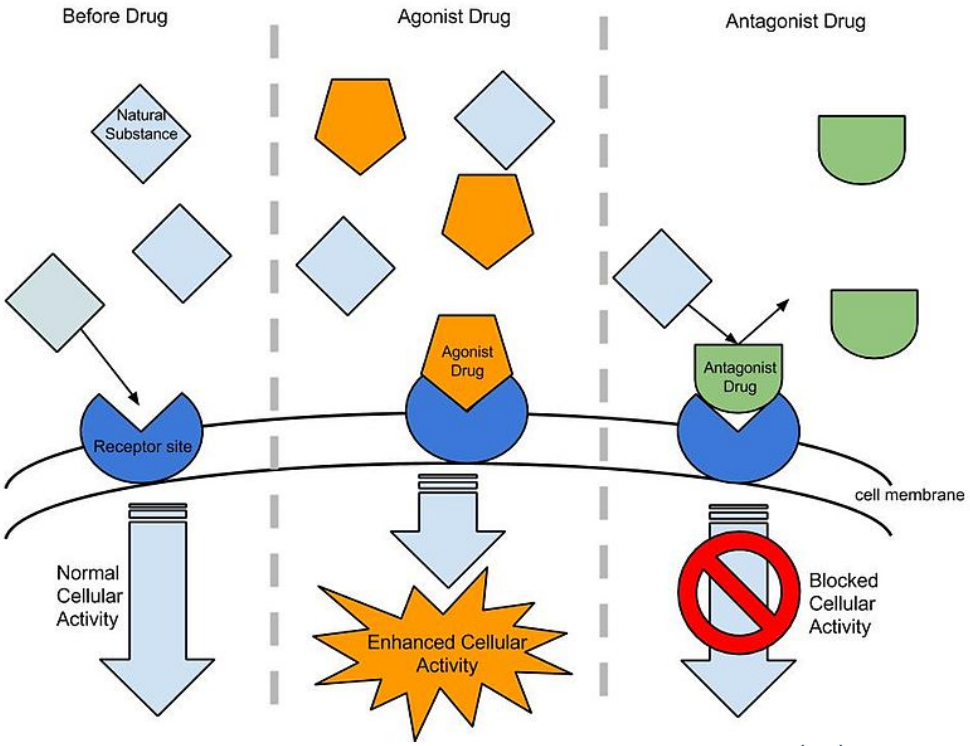
A következő lépésben gyógyszertani (farmakológiai) vizsgálatokkal azt próbálták kideríteni milyen átvivőanyag receptorok és milyen sejten belüli jelátvivő rendszerek játszhatnak szerepet a folyamatban.



Füveket feldolgozó sámán

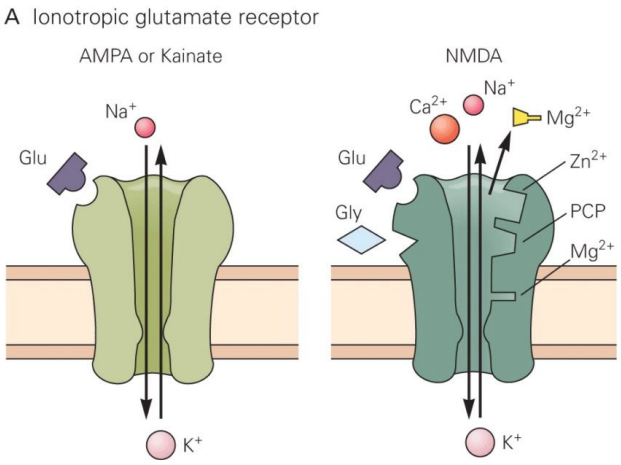
A gyógyszertan, farmakológia azt vizsgálja, hogy különböző természetes és mesterséges vegyületek milyen hatással vannak a szervezet, illetve ebben az esetben az idegrendszer működésér. A farmakológia gyökerei a sámánokig, törzsi varázslókig és javasasszonyokig nyúlnak vissza, akik az évezredek alatt megfigyelték, hogy bizonyos növényekből, gombákból és ritkábban állatokból vagy azok részeiből gyógyhatású, vagy/és mérgező főzetek készíthetők. Ami persze nem véletlen, hiszen mivel a növények nem tudnak elszaladni ezért ravasz, elsősorban az idegrendszerre ható mérgeket termelnek védekezésként. Ők ezt a tudást továbbfejlesztették egyéni megfigyelésekkel és továbbadták utódaiknak. A középkorban a katolikus egyház tűzzel vassal irtotta ezeket a „pogány" gyógyítókat, de szerencsére ugyanezen egyház szerzetesei a kolostorokban sok tudást átmentettek füveskönyvek formájában. Innen került aztán a kialakuló tudományba, hogy melyik természetes gyógyszer mire jó. A kémia tudománnyá válásával a tudósok is felismerték, hogy a természetes készítmények meghatározott anyagokat vagy anyagkombinációkat tartalmaznak, és kémiai szétválasztási eljárásokkal számos gyógyhatású anyagot különítettek el. Ezekről kezdetben nem lehetett tudni, hogy hogyan és hol hatnak, de kémiai szerkezetük ismertté vált. Idővel aztán hosszú kísérletsorozatokban tisztázták, hogy egy-egy anyag melyik szervben és hogyan hat, majd sok esetben azt is tisztázták pontosan milyen molekulák működését befolyásolják.

A farmakológiai hatóanyagok alapjában két módon hathatnak: 1) vagy hozzákötődnek a molekulának ahhoz a részéhez, amellyel funkcióját ellátja - például egy speciális kémiai átalakulást elősegítő fehérje (katalizátor, enzim) kötőhelyéhez – és ezáltal gátolják vagy ritkábban aktivált állapotban tartják azt. Illetve, 2) a molekula olyan részéhez kapcsolódnak, hogy ezáltal a molekula eredeti funkcióját megváltoztatják, hatását csökkentik vagy növelik.



A bal oldalon a jelátvitel alap állapota látható. A sejthártyában ülő receptor (kék) amikor jelátvivőanyagot (ligandum, szürke rombusz) köt, a sejt belseje felé továbbítja a jeleket. Középen egy agonista (hatásfokozó, narancs ötszög) hatása látható. A molekula úgy kötődik a receptorhoz, hogy azt működő állapotba rögzíti és ezáltal az eredeti hatáshoz hasonlót, vagy annál erősebbet vált ki. A jobb oldalon az antagonista (gátlóanyag, zöld) hatása látszik. Ugyan beül a receptor jelátvivőanyag kötőhelyére, de a receptort nem aktiválja, sőt megakadályozza, hogy ahhoz a természetes jelátvivőanyag hozzákössön, ezáltal a receptor működését gátolja.

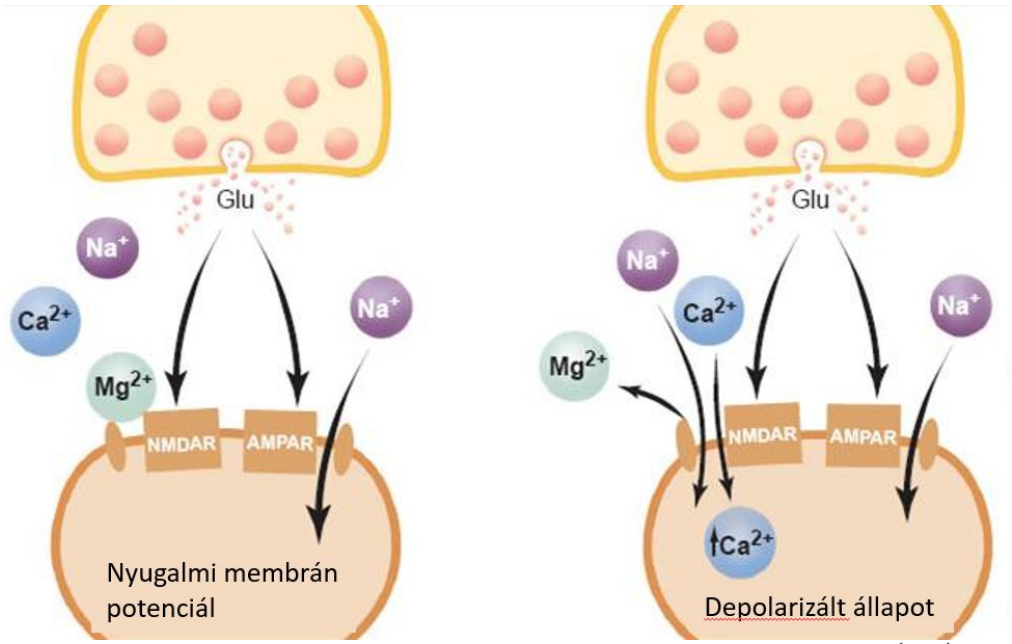
A funkciót gátló hatású molekulákat antagonistának, a serkentő hatásúakat agonistáknak, a működést megváltoztatókat pedig modulátoroknak hívjuk. Ezek a molekulák gyakran hasonló szerkezetűek a szervezetben eredetileg használt molekulákhoz, de gyakran előfordul, hogy kémiai felépítésük jelentősen eltér. Azért hatásosak mégis, mert nem a pontos felépítés számít, hanem hogy a molekula felszínén van-e olyan 3D részlet amelyik hozzá tud kapcsolódni a befolyásolandó molekula megfelelő helyéhez. Hogy milyen alakú a kulcstartó az ugye nem befolyásolja, hogy mit nyit a kulcs. Idővel az is kiderült, hogy egy-egy szervezetben előforduló jelátvivő molekula többféle jelfelfogó receptorhoz is hozzákötődhet és hogy a mesterséges molekulák nem minden receptortípushoz illeszkednek. Ha például nagyon nagy a kulcstartónk, akkor a sarokszekrényhez nem tudunk hozzáférni a kulcsunkkal.



Baloldalt a serkentő áramok nagy részének kialakításáért felelős AMPA receptor látható a glutamát kötőhelyével. Jobboldalt az NMDA receptor látható, melynek a glutamát mellett számos további kötőhellyel rendelkezik. Ezek egyike a Mg kötőhelye, mely feszültségérzékenységét okozza.

Az agykérgi serkentő sejtek közötti ingerületátvitelt a glutamát nevű aminosav végzi. Történetünk szempontjából itt két glutamát receptort kell megkülönböztetnünk. A glutamát mindkettőt aktiválja, de egy AMPA nevű anyaggal csak az egyik csoport aktiválható (AMPA receptor), egy NMDA nevű anyaggal pedig egy másik (NMDA receptor). Olyan anyagokat is találtak, amelyek igen válogatósan csak az egyik vagy csak a másik receptor típus esetében képesek megakadályozni a glutamát hatását, azaz az adott receptor típuson keresztül zajló információátvitelt lekapcsolni. Ezen anyagok használatakor kiderült, hogy az egyes glutamát receptorok más módon hatnak a sejtekben.

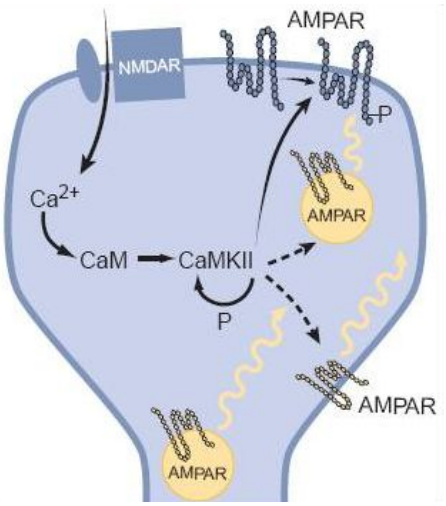
Huhh, végre eljutottunk odáig, hogy a szinapszis szintű tanulást elmagyarázhassam. A fenti kísérletekben azt találták, hogy amikor az AMPA receptorokat a megfelelő antagonistával gátolják, akkor a tesztimpulzusokkal korábban kiváltott serkentő áramok nagyrészt eltűnnek, jelentősen csökken a jelátvitel. Az NMDA receptorok gátlásának azonban más volt a hatása, attól függően a kísérlet melyik fázisában adták. Ha az NMDA receptorokat az LTP kialakításához szükséges erős stimulálás alatt gátolják, akkor nem figyelhető meg a hosszútávú hatásnövekedés. Ha az NMDA receptorokat ez előtt vagy ez után gátolták akkor a kiváltott válaszok a gátlás alatt valamivel kisebbek lesznek, de az ingerületátvitel megmarad. Ha az LTP már egyszer kialakult akkor az NMDA receptor gátlása nem okozott változást a megnövekedett válaszban (csak minimális csökkenést a gátlás idejére). Tehát **az NMDA receptor a tanuláshoz kell, az AMPA receptor pedig a jelátvitelhez**, mind a kezdeti, mind a megerősödött állapotban. Közel 10 év munkával számos kutatócsoport kibogarászta mi is történik pontosan.



Az NMDA receptor bekapcsolásánakfeltételei. Az aktív serkentő axonvégződésből (felül) felszabaduló glutamát kötődik a dendriten elhyelyezkedő szinapszisban található NMDA és AMPA receptrokhoz. A bal oldalon az az eset látható amikor a sejt nem kapott elegendő serkentést, membránja nyugalmi potenciálon van. Ilyenkor egy Mg2+ ion ül az NMDA csatorna nyílásában ézért az nem képes ionokat a sejtbe ereszteni. Csak az AMPA receptoron keresztül jutnak be Na+ ionok a sejtbe. A jobb oldalon az eset látható, amikor a sejt (más bemenetek hozzzájárulása eredményeként) depolarizálódik. A megváltozott membránpotenciál hatására az NMDA receptorból a Mg2+ iontávozik és képes lesz Ca2+ ionokat a sejtbe engedni, ezzel megindítja az LTP folyamatát.

Az AMPA receptor egy viszonylag egyszerű szerkezet, ha glutamát kerül a kötőhelyére kinyílik, elsősorban Na^+ ionokat enged a sejtbe, ezáltal annak belseje pozitívabbá válik, serkentődik. Ha kevés AMPA receptor van a szinapszis túloldalán a dendriten, akkor az axonterminálisból a szinaptikus résbe ömlő glutamát kevés AMPA receptort nyit és kicsi lesz a jel, a szinapszis gyenge. Ha sok az AMPA receptor akkor a kiváltott elektromos jel nagy, a szinapszis hatékonyan adja tovább az ingerületet. Érdekes adalék: egy nagyobb szinapszisban több AMPA receptor fér el, ezért erősebb posztszinaptikus áramot vált ki. Azaz elektron mikroszkópban becsülhető az egyes szinapszisok erőssége!

Az NMDA receptor egy bonyolultabb szerkezet. Neki két jel is kell ahhoz, hogy kinyisson. Az nem elég neki, hogy glutamáthoz jut, az ionok sejtbe eresztéséhez az is kell, hogy a dendrit, amin ül depolarizált legyen. A glutamát jelenléte ugye azt jelzi, hogy a beérkező axon aktív volt, azaz az információt küldő sejt aktív. A depolarizált dendrit azt jelzi, hogy a posztszinaptikus sejt már kapott elég serkentést és ő maga is aktív. Az NMDA receptor tehát csak akkor nyit, amikor a preszinaptikus sejt ÉS a posztszinaptikus sejt is aktív (a két sejt egyszerre). Azaz az NMDA receptor egy logikai ÉS kapu. Másik jellegzetessége, hogy a Na^+ ionokon kívül Ca^{2+} ionokat is beenged a sejtbe, és ezáltal egy bonyolult eseményláncolatot indít meg, melynek eredménye az, hogy a társítást (mindkét sejt aktiválódását) követően további AMPA receptorok épülnek be a dendritbe,



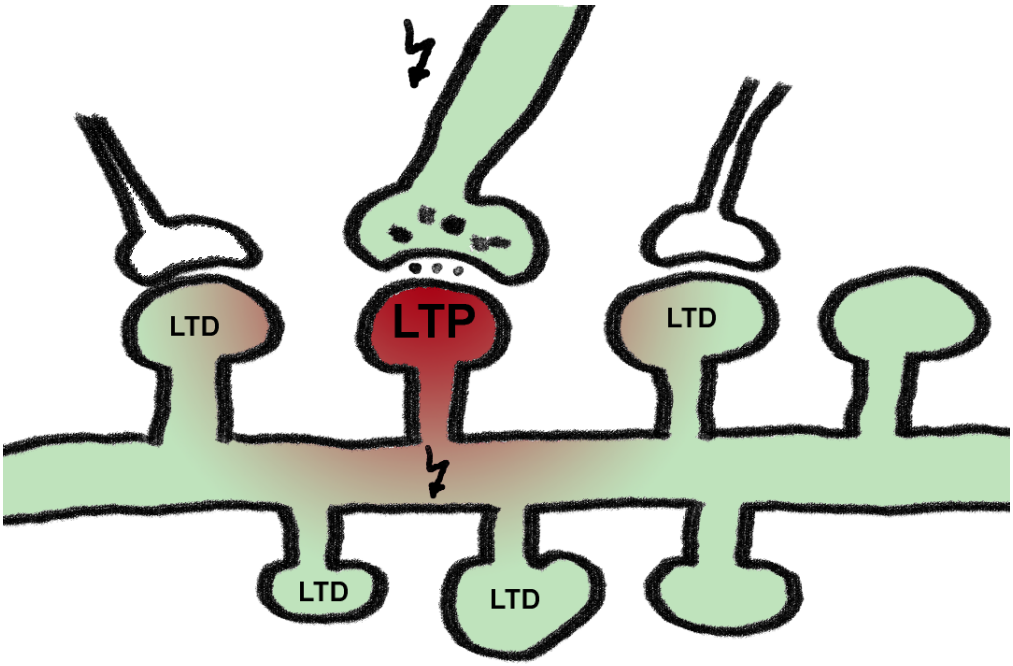
Molekuláris kölcsönhatások láncolata, mely a szinapszis megerősödéséhez vezet. Az NMDA receptor által beengedett Ca2+ egy CAMKII nevű molekulához kapcsolódik, ami

megnövelve ezáltal a szinaptikus átvitel hatékonyságát.
A Hebb szabály molekuláris szintű megvalósításáért tehát az NMDA receptorok a felelősek!

ennek hatására további AMPA receptorokat irányít a szinapszisba.

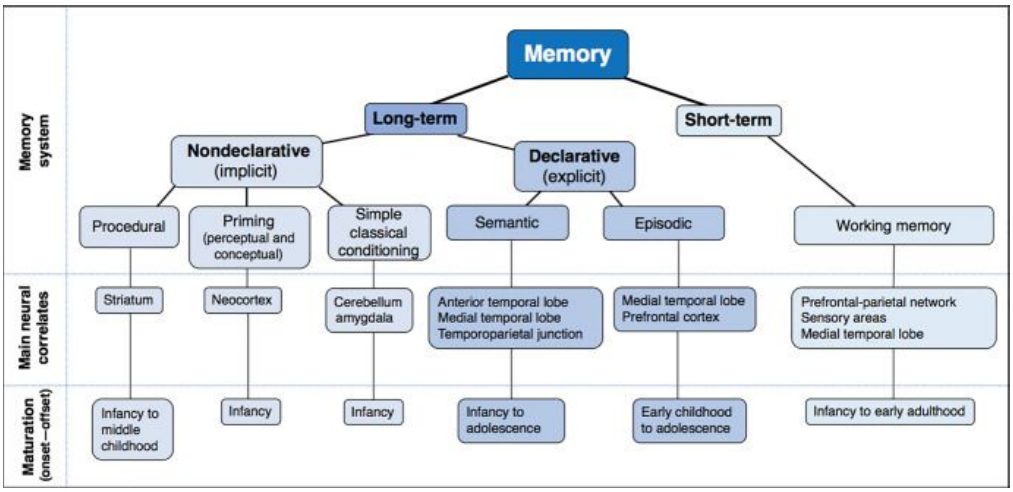
Aki bírja még a technikai részleteket annak bemutatunk még néhány idegsejt trükköt. A későbbiekben majd kifejtjük, hogy az idegsejtek aktivitásszintjének jól meghatározott határok között kell maradnia. Ha a sejteken a tanulás során minden szinapszis súlya csak felfelé módosulna akkor egy idő után a sejtek összes bemenete nagyon erős lenne, a sejtek nagyon könnyen aktiválódnának, ami lerontaná a jelfeldolgozást, a memóriatárolást és epilepsziás rohamok kialakulásához vezetne. Ennek elkerülésére egy ravasz folyamat azt eredményezi, hogy amikor a sejt Hebb szabály szerint erősödő szinapszisai erősödnek, az éppen nem megerősödő szinapszisok kicsit gyengülnek.

Ehhez a sejtek két dolgot fejlesztettek. Egyrészt a serkentő sejtekre érkező bemenetek nem közvetlenül a dendritre érkeznek, hanem a dendritekről gombakalap-szerűen kitüremkedő nyúlványokra, az úgynevezett dendrittüskékre. A szinapszisok az AMPA és NMDA receptorokkal a tüske fején találhatók. Amikor az NMDA receptor Ca^{2+}-t enged be akkor a tüskefejben magas lesz a Ca^{2+} koncentrációja és beindítja az AMPA receptorok szinapszisba épülését. A fej egy vékony szárral kapcsolódik a dendrithez, amelyen keresztül az elektromos jel leterjed, de a szűk nyak megakadályozza a Ca^{2+} ionok diffúzióját, a tüskefejbe szorítja nagy részüket, ezzel a tanulást az adott tüskére korlátozza. A másik trükk, hogy míg a magas Ca^{2+} szint további AMPA receptor beépülést és szinaptikus súly növekedést okoz, kis mennyiségű Ca^{2+} jelenléte ennek fordítottját okozza. A tüskenyakon kiszivárgó kevéske Ca^{2+} eljut a szomszédos tüskékbe, ahol az alacsony Ca^{2+} szint nem szinaptikus súly erősödést, hanem a szinaptikus súly kismértékű gyengülését váltja ki. Tehát ha egy sejt aktív, aktiválódott és ezáltal súlyát növelő szinapszisa közelében minden inaktív szinapszis erőssége kicsit csökken. Az ilyesmit hívják a matematikusok és a fizikusok renormalizációnak. Ugye itt az történik, hogy ha egy súly erősen nő a többi kicsit csökken, azaz a sejt szinaptikus bemeneteinek összege nagyjából állandó marad. Ennek a mechanizmusnak a jótékony hatása az, hogy agyműködésünk a biztonságos tartományban marad. Hátránya az, hogy amikor új emléknyomaink alakulnak ki, a régiek halványodnak… Agyunk úgy felejt, hogy az az emléknyom, amit nem frissítünk lassan kikopik.



Amikor egy serkentősejt dendritje depolarizált (zöld szín) és a tüskére érkező axon aktív (zöld axonterminális), akkor a tüskén található NMDA receptorok nyitnak és Ca2+ áramlik a tüskébe, mely a tüskefejben nagy koncentrációjú. A szűk tüskenyakon keresztül azonban egy kevés Ca2+ a szomszédos dendritágra és a rajta elhelyezkedő tüskékbe is eljut (piros árnyékolás). Ennek eredményeként az aktivált szinapsziban LTP, azaz szinapt erősödése, a szomszédos szinapszisokban pedig LTD, azaz a szinapszisok gyengülése következik be. Ez a mechanizmus a tanulás során megakadályozza, hogy a sejtekre érkező bemenetek összege túl nagyra nőljön.

Ezt a folyamatot kísérletesen is meg lehet figyelni. Az LTP folyamat ellentéteként és LTD-nek (long-termdepression-nek, azaz hosszútávú csökkenésnek hívják). Az LTP kísérlethez hasonlóan a teszt impulzusok után ha kicsit emelt frekvenciával, vagy nagyon sokat adnak gyenge impulzusokat, akkor a kapcsolat erőssége tartósan csökken. Ugye itt az történik, hogy a bemenet aktív glutamát szabadul fel, de a sejt csak egy picit depolarizálódik, anélkül, hogy kisülne. Ennek hatására egy kevés Ca^{2+} jelenik meg a sejt belsejében és megindul a szinaptikus súly csökkenése, hiszen nem volt korreláció a bemenet és a sejt kisülése között. Ennek kicsit más a molekuláris mechanizmusa mint az LTP nek, de végeredményként itt is az AMPA receptorok száma változik meg, értelem szerűen kevesebb lesz a szinapszisban. Hogy LTD is létezik annak természetesen a matematikusok örülnek, mivel így teljes a szinaptikus súlyváltozást leíró egyenlet. Nem csak pozitív, de negatív irány is van.



A tanulás és memóriarendszerek bonolultsága. Ez csak egy elrettentő ábra, majd az agyi rendszeek tárgyalásakor részletesen elemezzük.

A tanulás azonban nem csak ennyi. Itt csak annak a mechanizmusát mutattuk be, hogy egy egyszerű idegsejthálózatban hogyan történik a tanulás. Az emberi agyban ez csak egy alapelem, valójában sokkal bonyolultabb a tanulás. Egyrészt több különböző típusú tanulás és memória van (személyes emlékek kialakulása, mozdulatok és tények megtanulása), melyek eltérő agyi rendszereket vesznek igénybe. Másrészt az agy nem tanul meg mindent, hanem csak azt, amit megfelelő rendszerei éppen fontosnak tartanak. Ezekről a finomságokról majd az agyi területek szerveződésének a szintjén beszélünk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Neuronhálók újratöltve: A mátrix memória

Az örvényféregnél megtanultuk, hogyan képes egy egyszerű hálózat a szinaptikus súlyokban (táblázat=súlymátrix) hordozott memóriája segítségével dönteni. A kutyánál, majd a tengeri nyúlnál és a csikóhalnál megtanultuk hogyan tanulnak az idegsejtek. Most úgy csinálunk, mint a barkácsoló evolúció és megtöltjük az idegsejt hálózatokat tanulós szinapszisokkal, majd megnézzük mi történik.

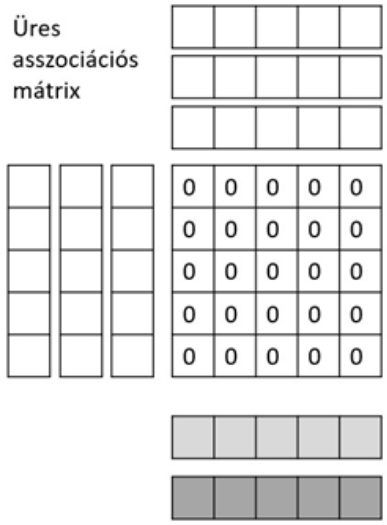
Ezt játszotta el a szigorú tekintetű Teuvo Kohonen a nyolcvanas években a Helsinki Technikai Egyetemen matematikai idegsejtekkel, és egy könnyen befogadható leírását adta, hogyan lehet egy hálózatban információt tárolni. Ráadásul oly módon, hogy a választ ne kelljen keresgélni, hanem a beküldött mintázat (kérdés) gyorsan, magától előhívja azt, amit korábban hozzá párosítottak (válasz). **Asszociatív, elosztott mátrix memóriának** hívják az eljárást, mely nemcsak a mesterséges idegsejthálózatok fejlődéséhez, de az idegrendszer megértéséhez is jelentősen hozzájárultak. A ChatGPT és egyéb Nagy Nyelvi Modellek (LLM) praktikusan ilyen hatalmas táblázatokból keresik meg a hosszú mintázat vektorokban feltett kérdésekre a választ.



Teuvo Kohonen

Miért hívják ezt a táblázatot asszociatív, elosztott mátrix memóriának? A matematikában a táblázatokat mátrixoknak, a sorba vagy oszlopba rendezett számokat pedig vektoroknak

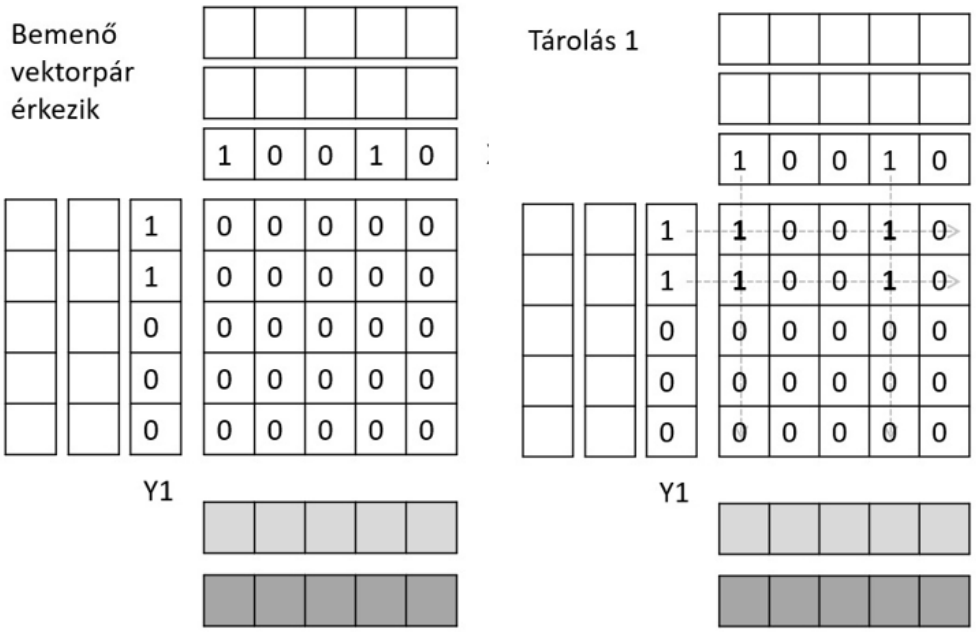
hívják. A táblázat egy-egy eleme egy kapcsolatnak felel meg a beleírt szám pedig a sorok és oszlopok közötti kapcsolat erősségének fele meg.
És mitől elosztott? Attól, hogy az információ a kapcsolati súlyokban van szétszórva, nem köthető pontosan egyetlen táblázat elemhez sem a tárolás. Hasonlít egy hologramra, ahol a 3Ds kép egy 2Ds fotólemez teljes felszínén elkenve tárolódik. A hologram sem romlik el, ha a lemez sérül, hanem a sérülés mértékével arányosan csökken a visszanyert kép (információ) élessége. Hasonló történik a mátrix memória esetében, ahogy egyre több hiba halmozódik úgy romlik lassan az előhívás pontossága.



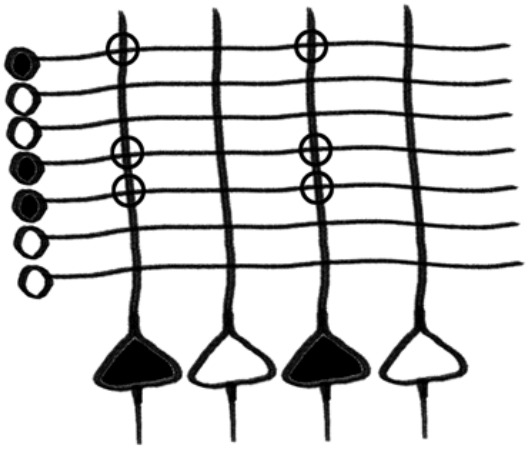
A kiinduló, üres mátrix

A következőképpen működik. Vegyünk egy táblázatot, melynek sorai és oszlopai vannak (jó, ha ugyanannyi sor, mint oszlop, de nem kötelező). A táblázatot kezdetben töltsük fel 0-kkal.

Vegyünk ezek után két 0-t és 1-et tartalmazó számsort. Ez lesz a két minta, amit egymáshoz akarunk párosítani.
A táblázat mellé egy oszlopba írjuk be az egyik mintát, fölé egy sorba a másikat. Ezek után menjünk végig a táblázat összes elemén és ahol a sor és az oszlopvég is 1-et mutat ott a 0-át írjuk át 1-re, vagy ha már 1 van akkor hagyjuk ott.

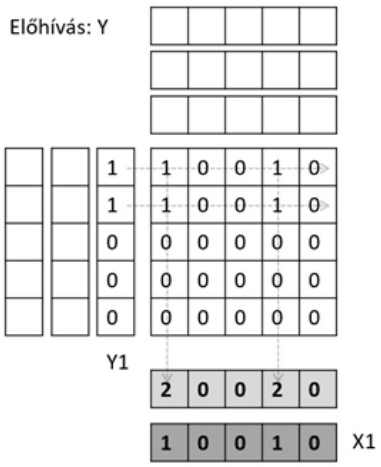


Az aktív sorok és oszlopok metszéspontjában a mátrix értéke 1-re vált



Idegsejtes megvalósítás: Az aktív keresztező axonok és denritek metszéspontjában található szinapszisok a Hebb szabály alapján megerősödnek.

De mi köze mindennek az agyhoz? Az örvényféregnél ugye már használtunk hasonló táblázatot. Itt a függőlegesen álló dendritű idegsejtek dendritjeire merőlegesen futó axonok alkotnak egy szinapszis rácsot, táblázatot, mátrixot. Az is ismerős lehet, hogy az az elem fordul 0-ból 1-be, ahol az axon és a dendrit is aktív, ez az az asszociatív Hebb szabály. Ha hálózatként képzeljük el a Kohonen mátrixot, a sejtek két helyről kapnak inputokat az oszlopok mentén (X) minden egyes sejt egy erős (detonátor, a sejtet mindenképpen kisütő) szinapszistól, illetve a bemeneti axonoktól, melyek a sorok mentén futnak (Y). Egy adott a sorokra és oszlopokra érkező bemeneti mintázat esetében azok a szinapszisok kapcsolnak 0-ról 1-re (a Hebb szabály szerint), amelyeknél a sejt és rá érkező axon is aktív.

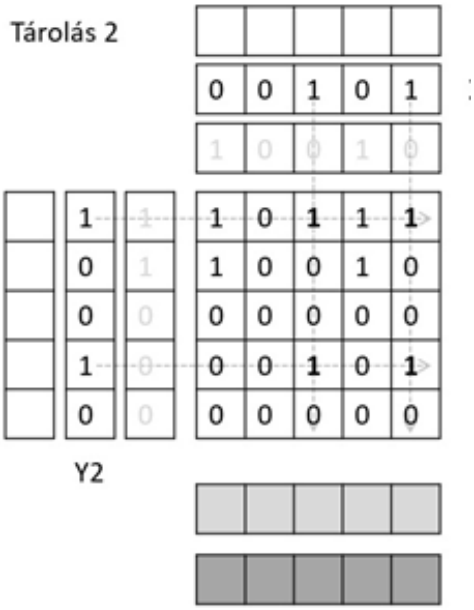


A sorokba érkező értékek a mátrix alapján összegődnek az oszlopok alján (világos szürke), majd osztás után előállnak a helyes 0/1 értékek (sötétebb szürke).

De mire jó ez? Nézzük meg mi történik, ha a sorok mentén beérkezik az eredeti vektor-pár egyike (Y1). Az ingerek beterjednek és összeadódnak. A gyengén szürkített dobozokban az egyes oszlopokban keletkezett serkentések értéke látható. Ebből egy kimenetet kell előállítani, ami 0/1 lehet. Kohonen azt találta, ki, hogy ezt az összeget (sejtre érkező serkentésnek felel meg) el kell osztani az aktív bemenetek számával, jelenleg 2, és azokban az oszlopokban lesz a kimenet 1, akiknél ez az érték nagyobb vagy egyenlő, mint 1.

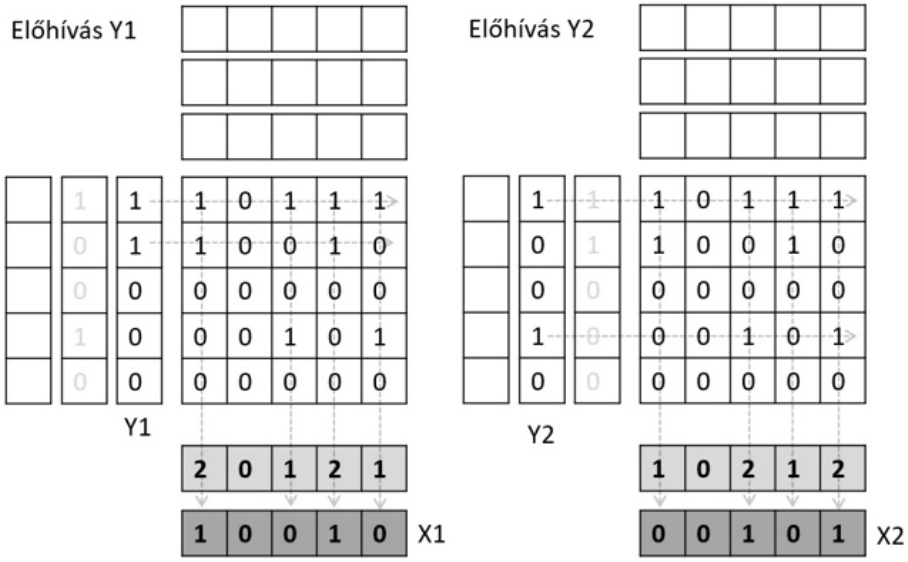
Ha ezt lefuttatjuk a táblázaton akkor az Y1 bementre megjelenő mintázat (a sötétszürke dobozokban) az X1 vektor lesz. **Szuper, helyesen előhívtunk!**

Próbáljunk meg egy másik mintázat vektor párt tanítani: X2 és Y2. Ezzel újabb szinapszisok billennek át 0-ból 1-be (vastagon szedett 1-esek).



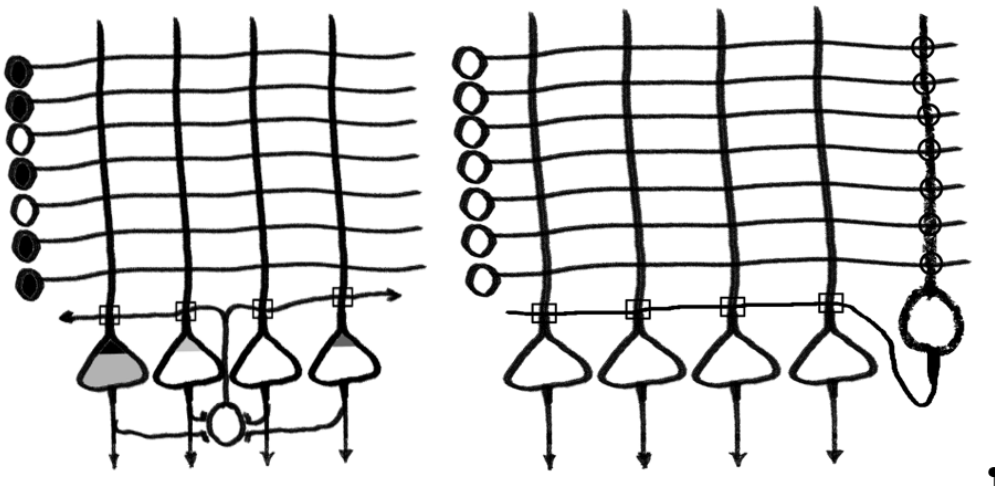
A második vektorpár eltárolása

Ha beadjuk aY1 vagy Y2 vektort a hálózat helyesen hívja elő a hozzá tartozó X1 vagy X2 vektort. Itt látszik, hogy a helyes előhíváshoz szükség van az osztásra (gátlásra), hiszen 0, 1 és 2 kettő is előfordul oszlopösszegenként (serkentésként).



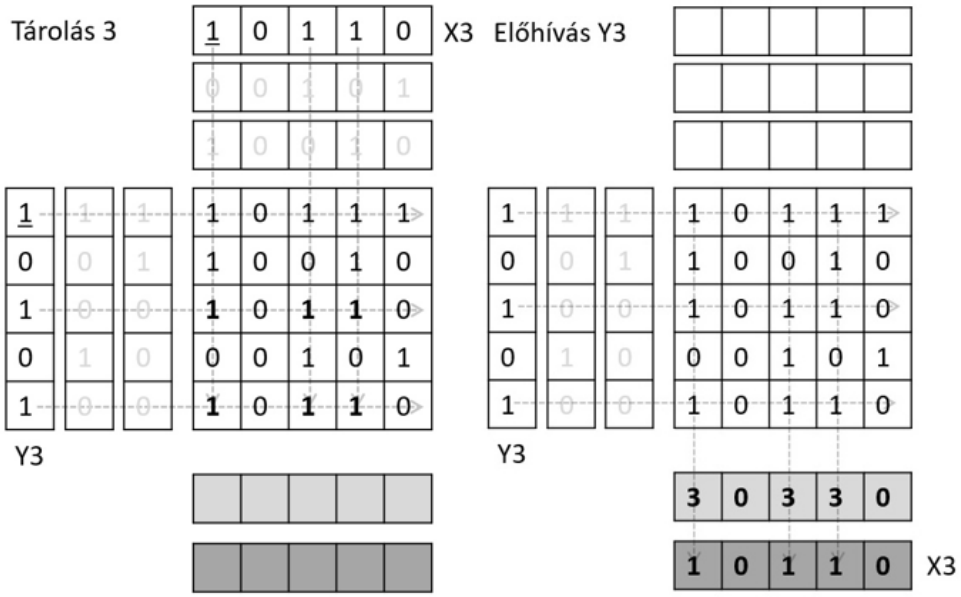
Y1 és Y2 bemenet helyesen hívja elő az X1 és X2 kimenetet

És itt látszik mire való az osztás hókuszpókusz: hogy helyesen tudjunk előhívni akkor is, amikor már több vektorpárt megtanult a mátrixunk. Az idegsejtes megközelítésben a beérkező serkentéssel arányos gátlásnak kell érkeznie a sejttestre, így csak az a sejt sül csak ki, akire megfelelően erős serkentés érkezett. Az örvényféreg döntése esetében a sejtek kimenetével arányos visszacsatot gátlást adott egy gátlósejt, hogy csak egy kimeneti sejt lehessen aktív. Itt egy másik gátlósejt elrendezésre van szükség, az előrecsatolt gátlósejtre, aki a serkentő bemenetekkel arányos gátlást küld vissza a kimenő sejtekre és ezáltal biztosítja a helyes előhívást.



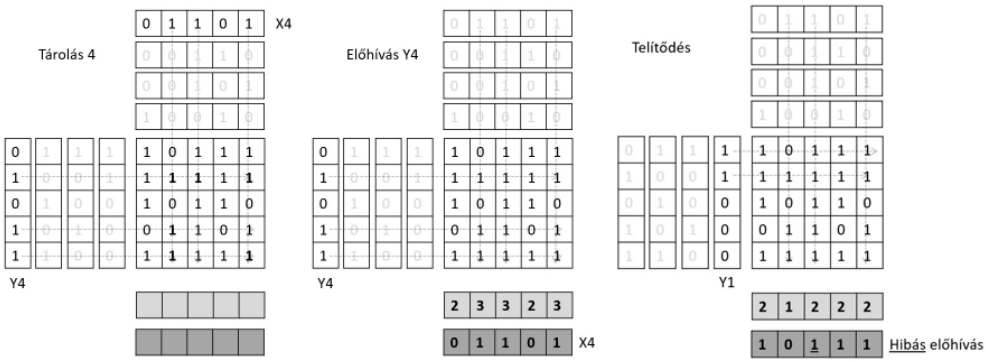
Gátlástípusok. Baloldalt a visszacsatolt gátlás. Ez biztosította az örvényféreg döntése esetében, hogy egyetlen kimenet legyen aktív. A körel jelölt gátlósejt az összes serkentősejttől megkapja a kimenetüket és mindegyik sejtet gátolja. Csak a legerősebben serkentett marad aktív. Jobboldalt az előrecsatolt gátlás, mely biztosítja hogy a helyes kimeneti mintázat jelenjen meg több tanulási ciklus után is. A kerek gátlósejt minden bemenetet megkap és ezzel arányos mértékben gátolja a serkentő sejteket.

Ezt a tanítást addig lehet folytatni, amíg a mátrixnak túl sok eleme nem lesz aktív.



A harmadik vektorpár (X3-Y3) eltárolása után az előhívás még helyes

Egy idő után még ennek a fenti ravasz (osztás / előrecsatolt gátlás) megoldásnak ellenére sem lehet a tanítást tovább folytatni. Ugyanis a memória telítődik, bármely bemenet túl sok kimenetet fog aktiválni, azaz hibás vektorok jelennek meg a kimeneten.



A negyedik vektorpár (X4-Y4) még helyesen hívódik elő, de egy már egy korábbi vektor (X3) hibás előhívását okozza.

Azt, hogy hány mintázat (vektor)-párt tudunk társítani függ attól, hogy a vektorok elemei közül mennyi aktív. Minél kevesebb elem 1-es, minél ritkásabb, kevésbé telített a bemeneti vektor, annál több párt tudunk társítani. Azaz, ha egy idegsejt háló jól akar tanulni akkor a mintázatok kódolására egy ritka (angolul sparse) kódolást kell használnia. Mint azt majd később bemutatjuk az agykéreg asszociációs területei ilyen kódolást használnak (az egyidőben aktív idegsejtek aránya jóval 10% alatt van).

A MM-ek további ügyes dolgairól a következő bejegyzésben.

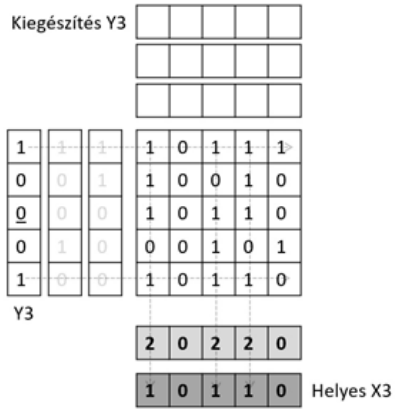
Szerző: **Gulyás Attila**

Mátrix forradalmak: Mintagenerálás, önálló aktivitás, általánosítás, csoportosítás ...

Idáig azt tanultuk az asszociatív mátrixokról (vagy a nekik megfelelő két rétegű, két bemenetű idegsejt hálózatokról), hogy képesek két rájuk érkező mintázatot társítani, ezáltal az egyikkel előhívható a másik. A hálózatoknak nem kell keresgélniük, a megfelelő kérdésre a megfelelő választ adják, azaz tartalom címzett memóriák (content addressable memory). Amit még tanultunk, hogy a mintázat párokban kevés aktív elemnek kell lennie, különben a mátrix néhány tanulás után telítődik és hibás válaszokat ad.

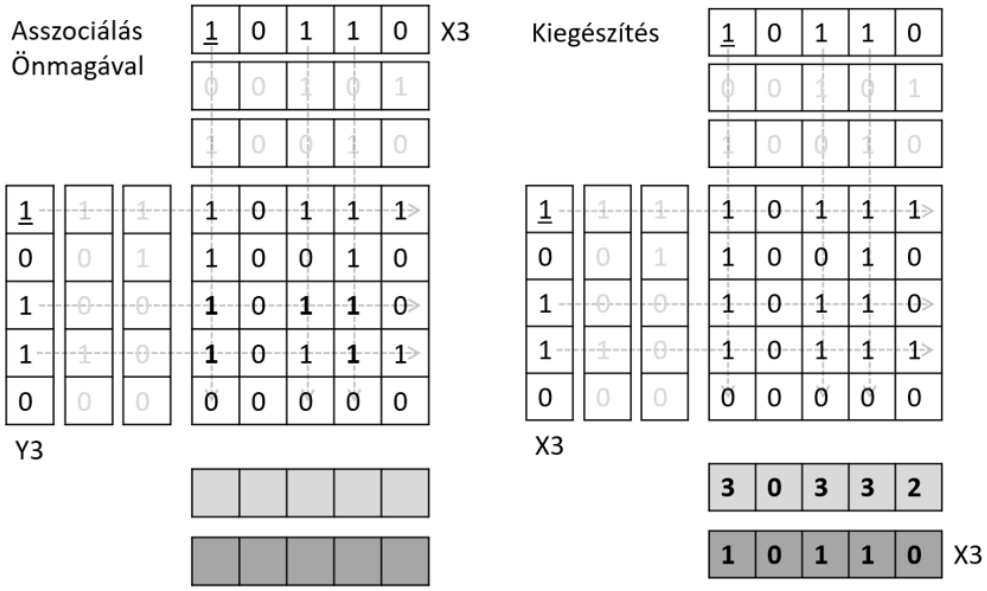
De egy asszociációs mátrix / kétrétegű neuronhálózat még mást is tud.

Próbáljunk meg például beadni az Y3 mintázatot úgy, hogy abból egy elem hiányzik (0 van a helyén). Meglepő módon az előhívott minta ilyenkor is helyes, azaz hálózatunk a hiányos mintákra is képes helyes eredményt előhívni.



Hiányos minta helyes előhívása

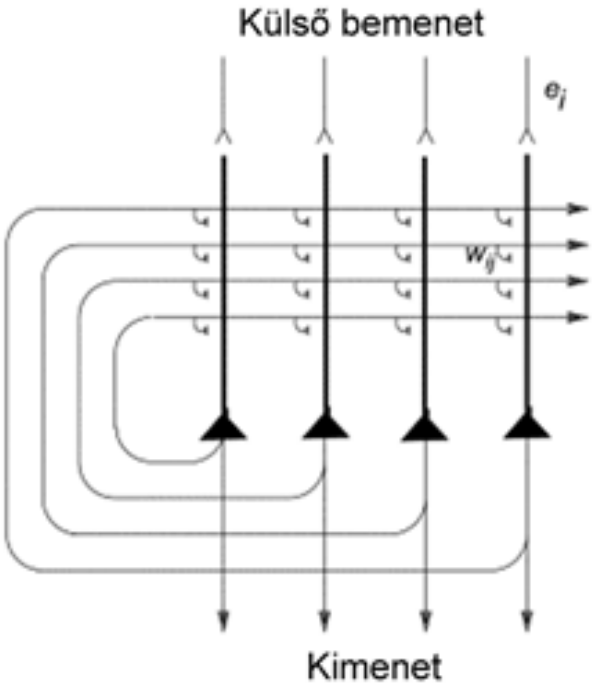
Ha történetesen egy mintát önmagával társítunk (ezt hívják auto-asszociációnak) akkor ugye ennek eredményeképpen az képes lesz a hiányos mintát helyesen előhívni, kiegészíteni.



Ha egy mintát önmagával társítunk a hálózat képes a hiányos mintát kiegészíteni

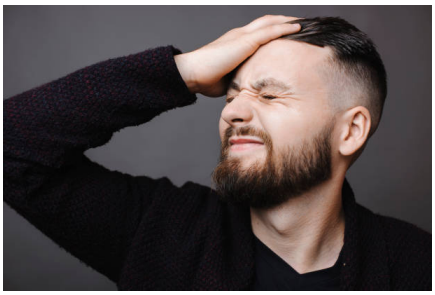
A hálózatok ezen tulajdonságának fontos szerepe van az idegrendszerben, amikor a környezet hiányos információiból kell majd kitalálni mi van ott. Nem mindegy ugye, hogy este a sötétben barátunk, egy fatörzs vagy egy gödör van előttünk.

De ha merészek vagyunk, olyat is csinálhatunk, hogy a hálózat oszlopokban elhelyezkedő sejtjeinek kimenetét visszaküldjük a sorokba.



Visszacsatolt hálózat, mely mintsorozatok előállítására képes

Ilyenkor két egymást követő mintázat elemei egymáshoz fognak társítódni (asszociálódni), hiszen a kimeneten megjelenő első bemenetet, a következő bemenettel fogja társítani. Ha beadunk egy X1, X2, X3, X4 mintasorozatot, akkor a hálózat megtanulja az elsőből a másodikat, a másodikból a harmadikat előállítani és így tovább. Ha az X4-t megint az X1 követi a tanítás során, akkor a sorozat bármely tagját beadva a hálózat végtelen ciklusban fogja generálni a minta-láncot (X1 X2 X3 X4 X1 X2 X3 X4 X1 ….). Egy ilyen visszacsatolt hálózat képes lesz egyszeri bemenetet követően mintázatokat generálni a végtelenségig. Mire lehetne ez jó kérdezi valaki? Hát például egy ismétlődő mozgás, teszem azt egy hal úszása, rovar mászása vagy emlős járása esetében az izommozgások előállítására. Vagy amikor számolni tanulunk: egy – kettő – három - .. kilenc – tíz – *tizen*-egy – *tizen*-kettő … Na ugye!



Hoppá!

Itt csapjunk a homlokunkra és vegyük észre, hogy valami nagyon fontos dolog történt! Az idegsejthálózatok (és általában minden rendszer) viselkedésének egy új elemét tapasztalhatjuk meg. Az előre csatolt hálózatok csak arra és akkor reagálnak amikor bemenet érkezik rájuk. Mint egy lusta alkalmazott, csak akkor csinál valamit, amikor a főnök rugdossa, és akkor is csak egy lépést. Ha a hálózatba visszacsatolás (rekurzió, feed-back) van beépítve, akkor, ha már korábban tanult valamit egyszer kell csak meglökni, és sokáig (vagy örökké) elketyeg (mint Az Ember Tragédiájában a világegyetem), visszamondja, amit korábban tanult. Olyan, mint egy okos, kezdeményező alkalmazott, aki mindig megtalálja hol lehet valamit csinálni. Egy visszacsatolt hálózat bizonyos szempontból függetlenné válik a környezetétől, saját „gondolatai" és belső állapotai lesznek.
Mint majd látjuk, a magasabb rendű agyműködés egyik legfontosabb eleme a visszacsatolás. Az agyi hálózatokban persze bonyolultabb a dolog, itt több irányból érkezhetnek bemenetek, amelyek kölcsönhatnak és így a külvilágból érkező információk és a belső állapot különböző mértékben határozhatja meg a kimenetet. Egy ilyen rendszer képes arra, hogy amikor dönt, akkor a korábban tanultakat, belső állapotát és a külvilág

ingereit



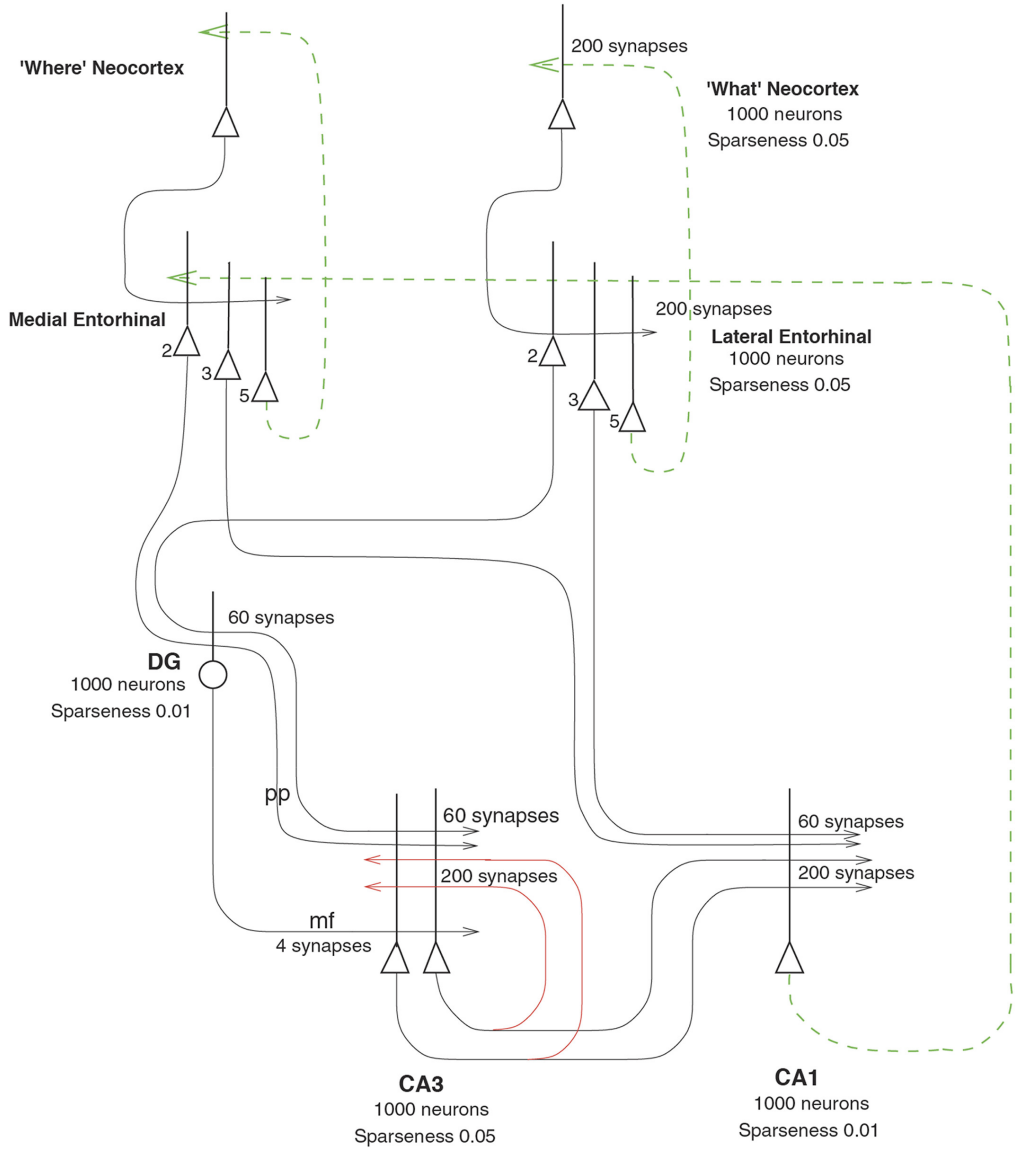


összevesse, és megfelelő válaszokat adjon. No persze a fenti egyszerű hálózatocskák ettől még messze vannak, de fontos lépést mutatnak fel ezirányba.

Vannak még további trükkök is, amikre már a csupán csak előrecsatolt hálózatok is képesek. Mivel eddig is kicsit túl sok volt az ábra ezeket már nem fejtem ki olyan részletességgel, de az ezzel foglalkozó szakembereknek (és nekem itt, most) el lehet hinni. Fentebb láttuk, hogy a helyes előhíváshoz előre- (mátrix memória) és vissza-csatolt (döntés az örvényféregnél) gátlásokra van szükség. Ezekkel a gátlásokkal szabályozható, hogy a kimenetet adó sejtek közül mennyi legyen aktív. Ha a hálózatunknak megengedjük, hogy a helyes kimeneti mintázat előállításához szükséges gátlás erőssége állítható legyen akkor hálózatunk képes lesz arra, hogy:
a) Szétválogasson: a bemenő mintákhoz egymástól minél jobban eltérő kimenő mintázatokat társítson. A matematikusok erre azt mondják, hogy ortogonalizál, azaz olyan kimenő mintákat állít elő, amelyeknek aktív elemei a lehető legkevésbé egyeznek. Például, amikor egy zacskóban levő csavarokat külön dobozokba teszünk, aszerint, hogy fához vagy fémhez valók, rövidek vagy hosszúak, hatlapfejűek vagy kereszthornyosak.
b) Osztályozzon: ha a gátlást kicsit lecsavarjuk, akkor eltérő bemeneti mintázatok is ugyanolyan kimeneti mintázatokat aktiválhatnak. Ezt a jelenséget klasszifikációnak, osztályozásnak hívják és a kiegészítés egy speciális esete. Például az alma, körte és narancs mintázat minden esetben hasonló kimenetet vált ki, hívhatjuk gyümölcs mintázatnak. A paradicsom, répa, zeller pedig egy másikat, ezt hívhatjuk zöldség mintázatnak.

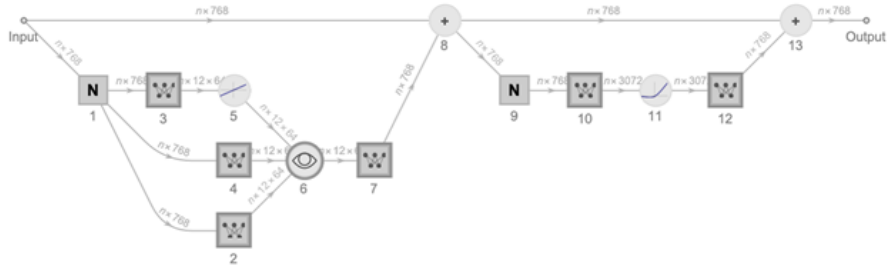
De olyat is lehet csinálni, hogy már a tanítás során bekapcsol a gátlás, és csak azokon a sejteken erősödnek meg a kapcsolatok, akik a legaktívabbak voltak. Ezt hívják versengő (kompetitív) tanulásnak, hiszen a sejtek versengenek ki tanulhasson. Ennek eredményeként a mintázatok még jobban szétválaszthatók egymástól és mivel egy minta-pár esetében csak kevés szinapszis változik az így tanított hálózatok sok mintát képesek raktározni és kimenetük ritkás lesz.

Az eltérő feladatokra hangolt egy-vagy több bemenetű előre vagy visszacsatolt hálózatokat azután megfelelően egymásba kötve bonyolult feladatokat is meg lehet oldani. A mellékelt ábra Edmund Rolls, elismert tanulás és memória kutató munkájából származó vázlat alapján készült neuronhálózat modell összefoglalása. Azt mutatja, hogy elképzelései szerint, milyen feldolgozási lépcsőkön keresztül jut el az információ az egyes érzeteket feldolgozó agyterületektől a hippokampuszba, ahol kialakul az itt és most, a pillanat élménye. A hippokampusz felelős azért, hogy fontos élményeinkből memórianyomok alakuljanak ki, majd ezek elraktározódását irányítja az egyes érzékcsatornákat feldolgozó agyterületen. A rajzon az egyes hálózatocskáknak csak egyszerűsített egy vagy néhány sejtet ábrázoló sémája látható, de a vlóságban egy-egy hippokampális területen sejtek százezrei-milliói találhatók. Ennek megfelelően az elraktározott memóriaelemek száma is nagyon nagy.



A memórianyomok kialakításában és trárolásában fontos hippokampusz információ feldolgozó hálózatának modellje. Ábramagyarázat a szövegben.

Az ábra alján a hippokampusz 3 egymás után kapcsolt területe látható. Az első területen, DG-vel jelölve, egy ortogonalizáló (szétválogató), előrecsatolt hálózat helyezkedik el, mely az egymáshoz hasonló bemenetek közötti különbséget hangsúlyozza, és ritka kimenő kódot állít elő. Ez a jel kerül aztán a CA3-al jelölt területre, mely egy visszacsatolt, auto-asszociatív hálózat, mely ráadásul több helyről is kap bemeneteket, melyek itt keverednek össze egyetlen reprezentációba. Ez a terület mintakiegészítést és mintasorozatok előállítását végezheti. Innen a CA1 területre kerül a jel, mely megint egy előrecsatolt hálózat, és kapcsolati struktúrája alapján valószínűleg osztályoz.



A ChatGPT alapjául szolgáló Deep Learning

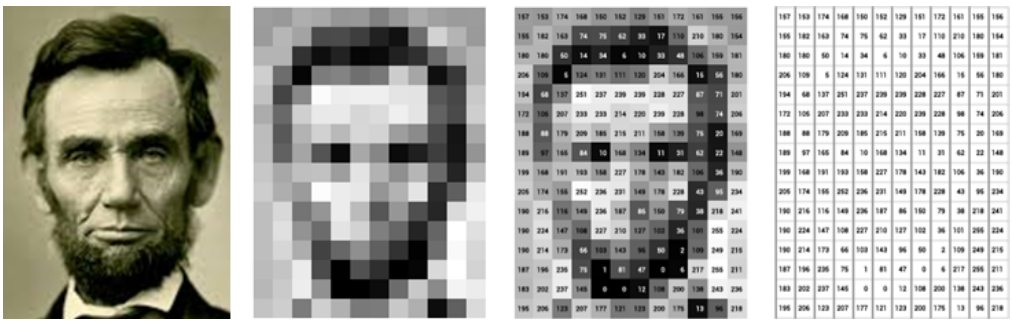
Hasonlóan eltérő tulajdonságú hálózatocskák rétegződnek egymásra a mesterséges intelligencia jelenlegi csúcsát jelentő Nagy Nyelvi modellekben (LLM), mint például a ChatGPT-ben is. Itt is ortogonalizálásra, kódritkításra, auto asszociációra alkalmas rétegek váltakoznak. Mint azt korábban írtam, a ChatGPT-ben 600 réteg kapcsolódik több milliárd „szinapszis", táblázat elem útján.

Szerző: **Gulyás Attila**

Hogyan kódolják az idegsejtek a külvilágot: reprezentáció – receptív mezők, populációs kód

Ebben a bejegyzésben kicsit megerősítjük a korábban mondottakat, hogy a következő mesére, a Kismacska meséjére fel tudjunk készülni. Azért van erre szükség, hogy a *reprezentáció* és *a receptív mező* fogalmakat a továbbiakban bátran használhassuk. Nem kell megijedni, már több alkalommal is kerülgettük őket.

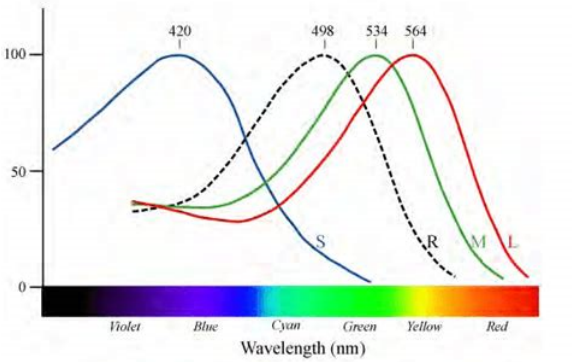
Amikor az örvényféreg egyszerű, döntésre képes hálózatában a bemeneti réteg sejtjeiről beszéltünk, akik a külvilág és a belső állapot értékeit érzékelték, már érintettük, mondtunk olyat, hogy az érzéksejtek működésének szintje reprezentálja, kódolja az állatka számára a kül- és bel-világ állapotát. Ugyanígy Pavlov kutyája esetében amikor az első és második jelzőrendszerről beszéltünk, szintén a reprezentációról volt szó. A reprezentáció a *re-presentare*, azaz újra-mutatás latin gyökérből ered, és azt jelenti, hogy egy dolgot egy másikkal helyettesítve jelzünk, egy másik formában jelenítjük meg. A külvilág bizonyos ingereit bizonyos idegsejtek aktivitás írja le, és ezáltal amikor ezek a sejtek aktívak, akkor lehet tudni (inkább sejteni), hogy a külvilágban éppen mi történik. Ezt fejti ki az #agyhirek rovatban korábban megjelent bejegyzés az idegsejtek kódolási trükkjeiről, javaslom, hogy a továbbhaladás előtt olvassátok el (vagy újra) a cikket.



Hogyan alakít egy CCD kamera egy képet számok táblázatává, egyfajta aktivitás mintázattá. Az idegrendszer is hasonlóan kódol.

No ha megvolt…
Fontos még hangsúlyozni azt, hogy a kódolást két irányból lehet nézni. Egyrészt, hogy az

egyes idegsejteknek milyen a receptív mezeje, mi az az inger amire a legerősebben reagálnak. De nézhetjük abból az irányból is, hogy egy adott inger mely idegsejteket és milyen erősen aktivál, milyen a sejtek populációs aktivitása, kik szólalnak meg egy-egy helyzetben. Ugye ez egy igazi mintázat, melyet elemeznünk kell. Már csak azért is, mert ha egy ingert nem egyetlen sejt, hanem sejtek csoportjának aktivitása kódolja sokkal pontosabb lesz annak reprezentálása.
Ez a legjobban a színérzékelés példáján mutatható be.
Szemünkben háromféle eltérő színérzékenységű csap található, melyek a szivárványból a kékre a zöldre és a pirosra a legérzékenyebbek, de más hullámhosszakat is látnak, csak kevésbé. Nem véletlen, hogy a monitorok RGB, azaz red (piros), greeen (zöld) és blue (kék) alapszíneket használnak, hiszen szemünk ezekre az alapszínekre a legérzékenyebb. Átmeneti színeket, például a sárga színt az jelzi agyunknak, hogy a zöld és a kék csapok közel egyforma mértékben aktiválódnak. Mivel a csapok fényérzékenysége a csúcstól távolodva meredeken esik ahogy a beeső fény színe változik az egyes sejtek aktivációs aránya jelentősen változik. A színeket az agyunk számára tehát az kódolja, hogy a 3 sejttípus milyen arányban aktiválódik.



A retinában található 3 féle színérzékelő csap (színes görbék) és a fényerősséget érzékelő pálcikák (fekete szaggatott) érzékenységi görbéje a hullámhossz függvényében.

Az idegrendszerben tehát sosem egyetlen idegsejt működése kódol valamit, hanem mindig sejtek egy csoportja. Ezt a szakemberek populációs kódnak hívják. Ha megfigyeljük, hogy egyes ingerekre mely sejtcsoportok aktiválódnak a későbbiekben visszafejthető, hogy egy adott sejtcsoport működése mit reprezentál.

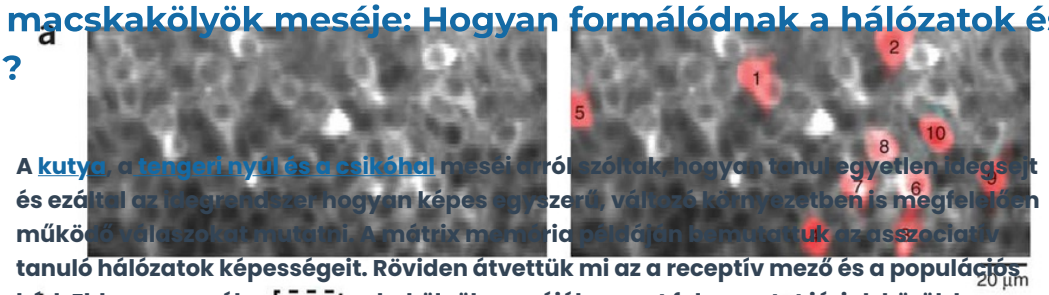
Azt, hogy a kódolást elsősorban a receptív mező felől nézzük (néztük), azaz, hogy az egyes sejtek mire érzékenyek, annak történelmi okai vannak. A hőskorban csak egyes sejtek működését lehetett mérni. Hubel és Wiesel egy sejtből vezetett el miközben mutogatott a macskának. Egy sejttől pedig ugye azt lehet megkérdezni mit látsz? Mi az az inger amire reagálsz. Az elmúlt másfél évtized technikai fejlődése, mely megadta nekünk sokcsatornás elektródokat, a tetródot vagy az optogenetikát lehetővé tette, hogy viszonylag jó időbeli felbontással több száz idegsejt működését vizsgálhassuk egyszerre. Végre hozzáférhetünk a populációs kódhoz, a mintázatokhoz, hogyan reprezentálja az agy világot.

Mindenkinek csokival teli cipőt kívánok!

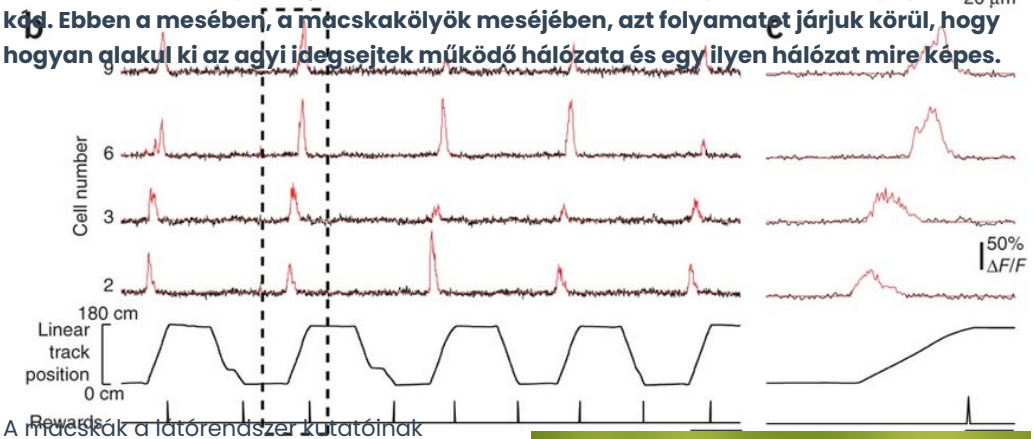


Szerző: **Gulyás Attila**

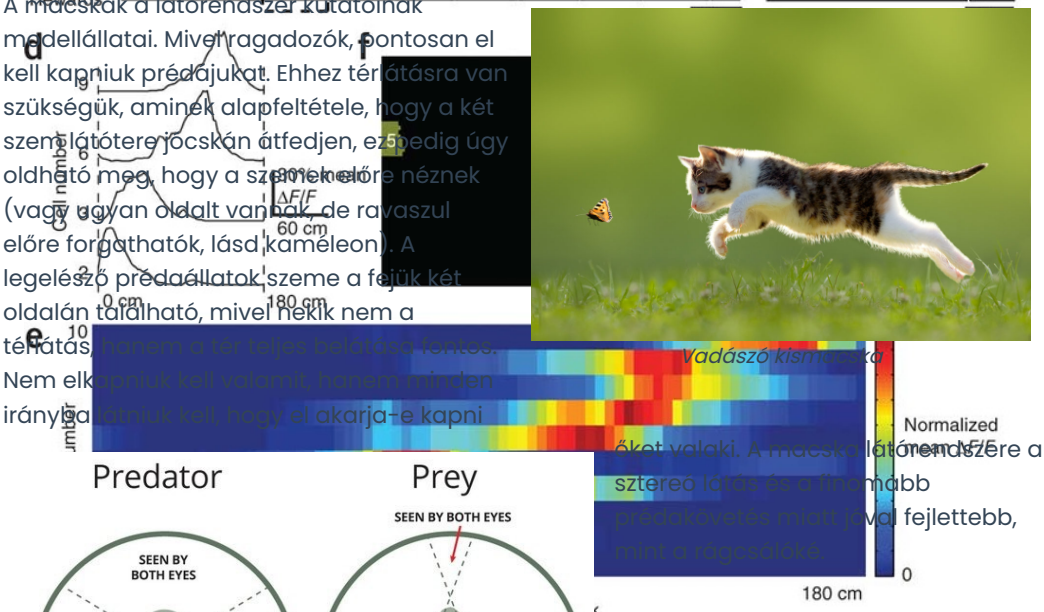
A macskakölyök meséje: Hogyan formálódnak a hálózatok és hova jutnak el?



A kutya, a tengeri nyúl és a csikóhal mesei arról szóltak, hogyan tanul egyetlen idegsejt és ezáltal az idegrendszer hogyan képes egyszerű, változó környezetben is megfelelően működő válaszokat mutatni. A mátrix memória példáján bemutattuk az asszociatív tanuló hálózatok képességeit. Röviden átvettük mi az a receptív mező és a populációs kód. Ebben a mesében, a macskakölyök meséjében, azt folyamatot járjuk körül, hogy hogyan alakul ki az agyi idegsejtek működő hálózata és egy ilyen hálózat mire képes.

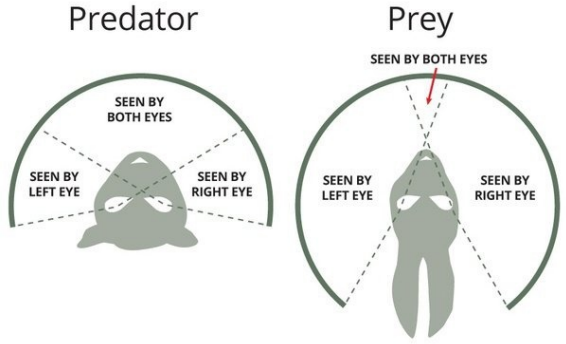


A macskák a látórendszer kutatóinak modellállatai. Mivel ragadozók, pontosan el kell kapniuk prédájukat. Ehhez térlátásra van szükségük, aminek alapfeltétele, hogy a két szemlátótere jócskán átfedjen, ez pedig úgy oldható meg, hogy a szemek előre néznek (vagy ugyan oldalt vannak, de ravaszul előre forgathatók, lásd kaméleon). A legelésző prédaállatok szeme a fejük két oldalán található, mivel nekik nem a térlátás, hanem a tér teljes belátása fontos. Nem elkapniuk kell valamit, hanem minden irányból látniuk kell, hogy el akarja-e kapni őket valaki. A macska látórendszere a sztereó látás és a finomabb predakövetés miatt jóval fejlettebb, mint a rágcsálóké.



Vadászó kismacska

lag jelölt idegsejtek láthatók, melyek közül tivitása az optikai jel alapján, alul pedig az az egyes sejtek maximális aktivitása az aktív változó arányokban. d) Átlagolt nyében. f) Színkódolás mutatja, hogy az k leginkább.



A ragadozó (bal) és prédaállatok (job) látótere eltérő mértékben fed át,. A térlátásért cserébe a ragadozók feláldozzák látóterük egy részét.

A ragadozók másik jellegzetessége, hogy mivel a préda után kell szaladgálniuk és a vemhes anyát nagy hasa ebben akadályozza, a ragadozók utódaikat viszonylag korán, fejletlenül szülik meg (a kismacska szeme születésekor még nem nyílt ki) és egy védett fészekben hagyják. Ellentétben például egy gnú borjúval, akinek születése után fél órával már követnie kell a csordát. Emiatt a korai születés miatt a kismacskák látórendszere is fejletlen születéskor és az első néhány hétben sokat fejlődik.

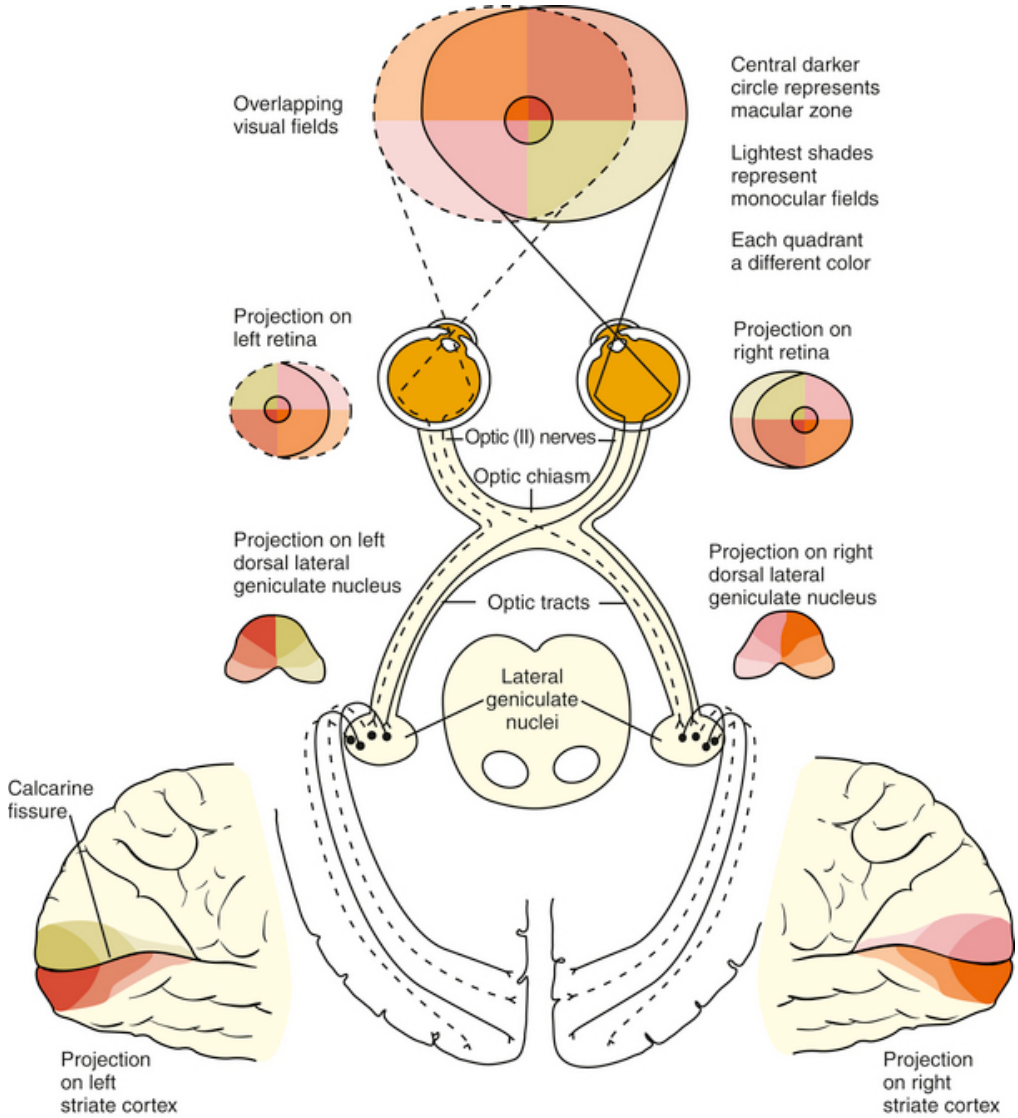


Újszülött magatehetetlen kismacska



Újszülött, hamarosan menekülésre képes borjú

A macskák a fenti két dolog miatt, a látórendszer, és annak fejlődésének vizsgálatára remek modell állatok. Az anatómusok azt találták, hogy a megszületett kismacska agyában a látórendszer kapcsolatai már nagy vonalakban kiépültek. A szemben található recehártya (retina) ganlion sejtjeiből induló axonok eljutnak a talamusz oldalsó térdes test (LGN) nevű magjába, ahol az ott található átkapcsoló (relay) sejteket idegzik be, melyek az információt tovább küldik a látókérgek, elsősorban az elsődleges látókéreg (V1) felé, ahol agykérgi serkentő idegsejteken végződnek.



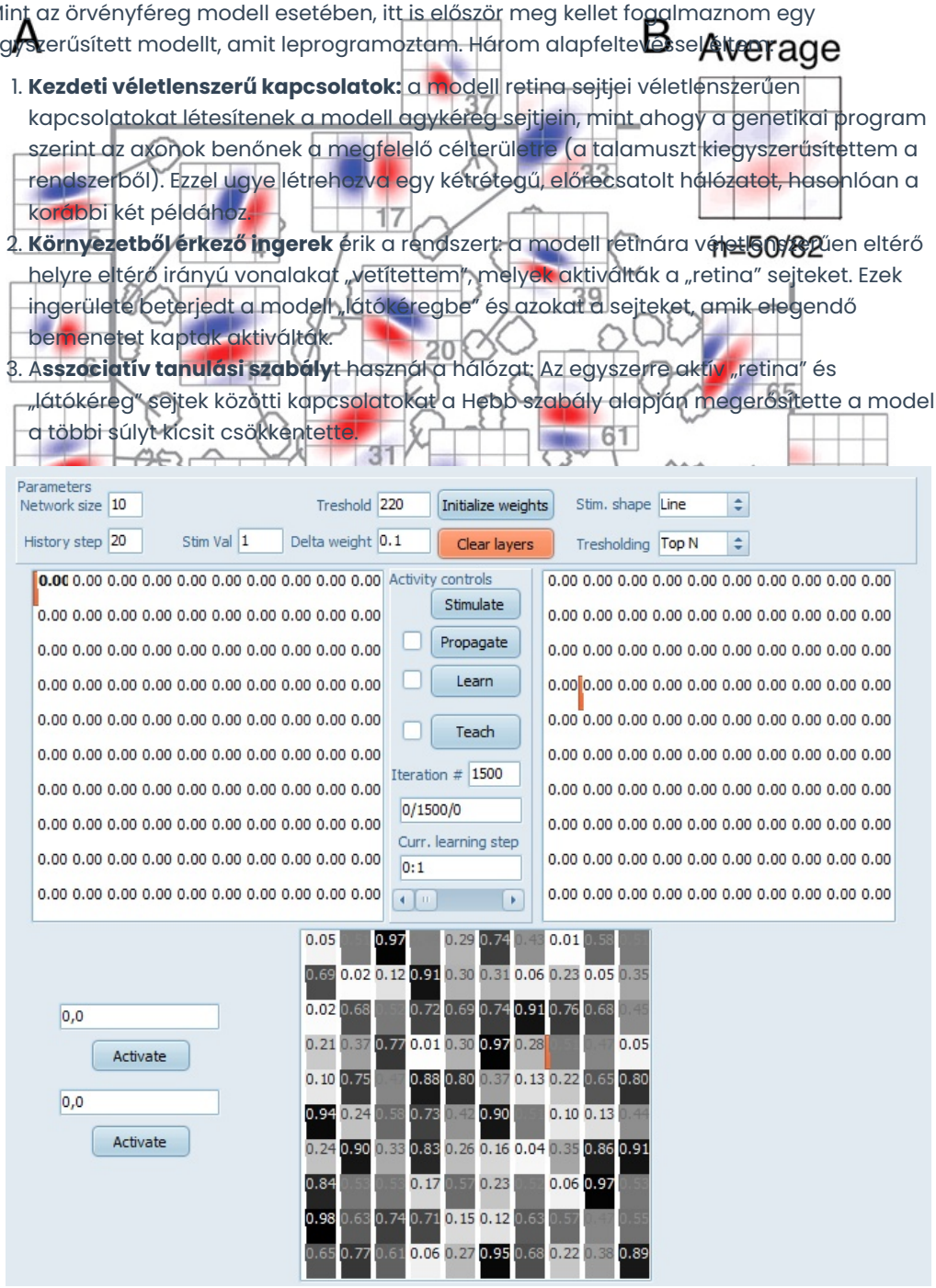
A látórendszer vázlata egy sztereó látással rendelkező állatban. A szemekből a részben kereszteződő látóidegen keresztül az információ a thalamuszhz tartozó oldalsó térdes testekbe kerül (angol rövidítése LGN). Itt átkapcsolódik és a relay sejtek az tarkólebenyben található elsődleges látókéreg (V1) felé küldik az információt.

A kapcsolat finomszerkezete nem nagyon tér el a felnőtt macska látópályájától, látszólag minden a helyén van. Ennek ellenére, ha közvetlenül szemnyílás után elektrofiziológiai módszerekkel megvizsgálják a látókérgi idesejtek receptív mező tulajdonságait, éretlen, szabálytalan receptív mezejű sejteket találnak. A kismacska látókérgének 1-2 nap kell ahhoz, hogy kialakuljanak a felnőttre jellemző határozott receptív mezők, mely a V1 esetében a látótér különböző területein eltérő irányba álló vonalak. Vannak sejtek, akik a látótér bal felső sarkában lévő vízszintes vonalra érzékenyek és vannak, akik az alján, ferdén álló vonalakra érzékenyek.

Mindezekről akkor olvastam, amikor diákkörösként elkezdtem dolgozni a Szentágothai János vezette laboratóriumban, mivel kezdeti munkám macska látókéreg idegsejttípusainak leírása volt. Meglepett az a sebesség, amivel a kismacska látókérge megtette az első lépéseket a látás útján. Megpróbáltam megérteni mi is történhet. Hobbimnak hódolva, írtam egy programot, ami megpróbálta utánozni mi történhet a kismacska esetében. Ebből nagyon sokat tanultam az egyszerű hálózatkról és ezek a felismeréseket osztom itt most meg.

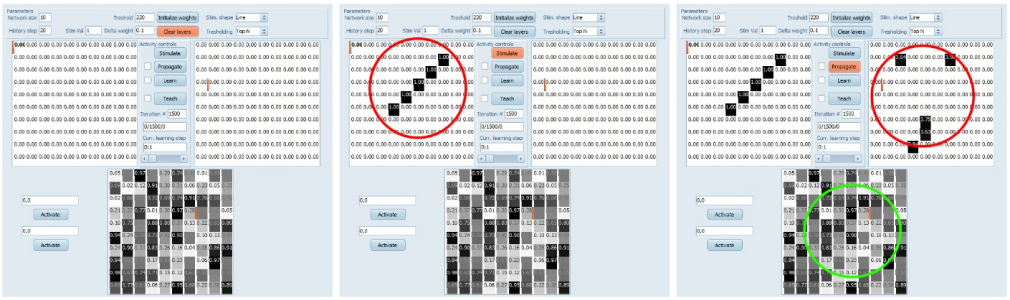
Mint az örvényféreg modell esetében, itt is először meg kellet fogalmaznom egy egyszerűsített modellt, amit leprogramoztam. Három alapfeltevéssel éltem:

1. **Kezdeti véletlenszerű kapcsolatok:** a modell retina sejtjei véletlenszerűen kapcsolatokat létesítenek a modell agykéreg sejtjein, mint ahogy a genetikai program szerint az axonok benőnek a megfelelő célterületre (a talamuszt kiegyszerűsítettem a rendszerből). Ezzel ugye létrehozva egy kétrétegű, előrecsatolt hálózatot, hasonlóan a korábbi két példához.
2. **Környezetből érkező ingerek** érik a rendszert: a modell retinára véletlenszerűen eltérő helyre eltérő irányú vonalakat „vetítettem”, melyek aktiválták a „retina” sejteket. Ezek ingerülete beterjedt a modell „látókéregbe” és azokat a sejteket, amik elegendő bemenetet kaptak aktiválták.
3. A **asszociatív tanulási szabály**t használ a hálózat: Az egyszerre aktív „retina” és „látókéreg” sejtek közötti kapcsolatokat a Hebb szabály alapján megerősítette a modell, a többi súlyt kicsit csökkentette.



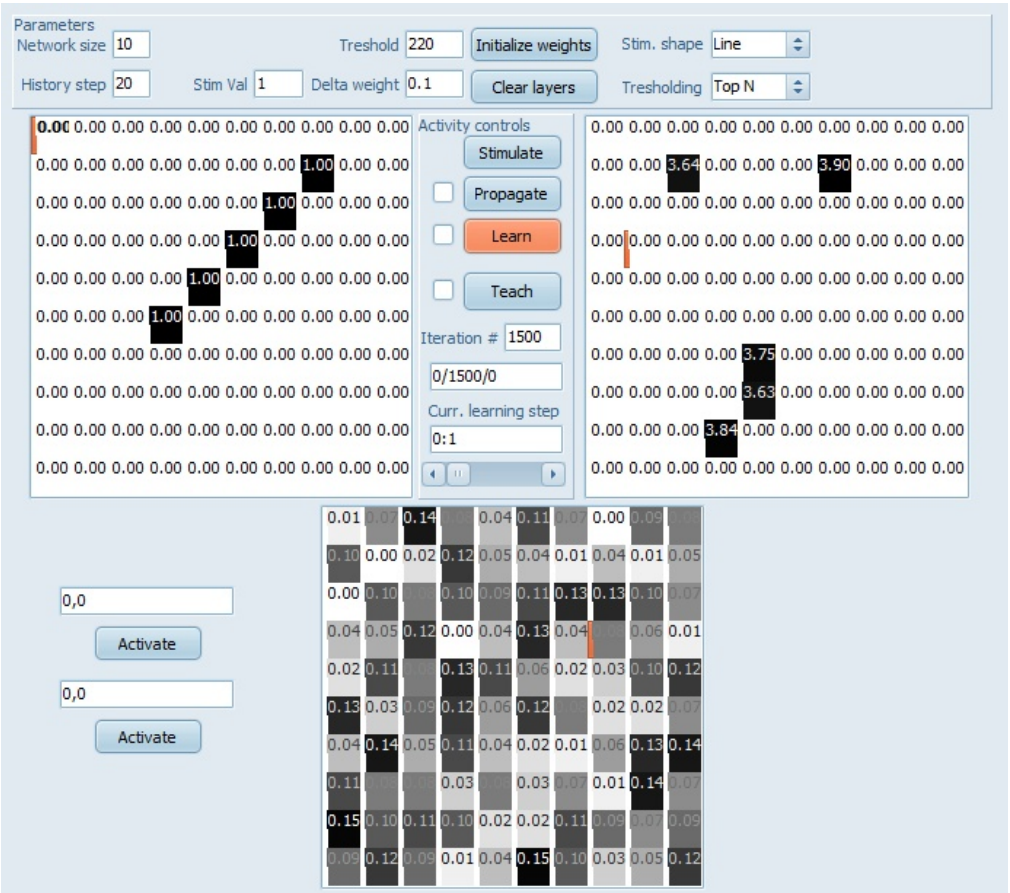
A modell felhasználói felülete. Felül balra a 'retina' táblázata, amit az egyenes vonalakkal 'világítunk meg, jobboldalt az 'agykéreg' táblázata. Az alsó táblázat mutatja, hogy a retinában vagy agykéregben kiválasztott sejt milyen kapcsolatokkal rendelkezik a másik felé. Ezzel lehet leellenőrizni egy kérgi sejt receptív mezejét. Felül a tanulás finomhangolásához szükséges paraméterek állíthatók.

A modell kismacska látórendszere tehát egy véletlenül beállított retina-agykéreg kapcsolatrendszerrel indult. Egy táblázatot töltöttem ki véletlen számokkal, mely megmondta melyik retina sejt melyik kérgi sejttel, milyen erős kapcsolatot alkot.



A program három állapota: bal: kiindulási állapot, nincs aktivitás és a szinptikua súlyok véletlenek, közép: a 'retinát' egyenes vonallal ingereljük (piros karika), jobb: az ingerület a szinapszisokon keresztül beterjed és a 'kérgi' sejtek egy részét ingerli (piros karika). Az aktív sejtek közötti szinapszisok megerősödnek a többiek gyengülnek (zöld karika)

Ezután a retinára véletlenül elhelyezett vonallal ingereltem a sejteket, a táblázat alapján kiszámoltam, hogy az agykéreg egyes sejtjei mennyi serkentést kaptak, és mely sejteknél érte ez el az aktiválódási küszöböt. A következőkben az aktív retina sejtek és az aktív agykérgi sejtek közötti kapcsolatot megerősítettem, hiszen a két sejt aktivitása összefüggött (korrelált, társított). Ezt tanítási ciklust aztán több százszor megismételtem: új inger, jelterjedés, sejtaktiválódás, asszociatív tanulás.

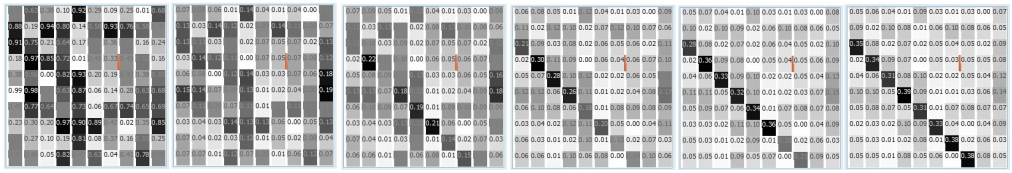


Egyetlen tanulási ciklus után a szinaptikus súlytáblázat értékei (alsó táblázat) megváltoznak (összehasnlítható a kiinduló táblázattal.)

Ahhoz, hogy ez a két rétegű (retina és agykéreg) hálózat jól működjön és tanuljon, persze sokat kellett játszani a paraméterek hangolásával. Ha a kezdeti szinaptikus súlyok túl erősek voltak vagy az agykérgi sejtek tüzelési küszöbe túl alacsony volt, akkor bármit is mutattam a retinának az összes agykérgi sejt aktiválódott és ezek után minden kapcsolat előbb utóbb maximálisra nőtt (a mátrix memória példáján bemutatott telítődés történt).

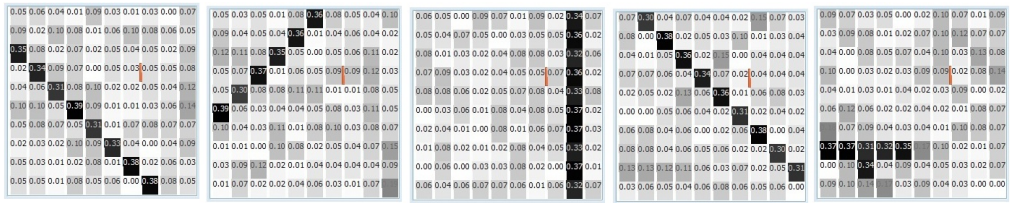
Az volt a jó, ha a paramétereket úgy állítottam be, hogy a kérgi sejteknek kevesebb mint 1/10e kapcsoljon be egy adott ingerre. Ettől persze még ha túl nagy lépésekben történt a tanulás, a szinaptikus súlyok mindegyike megerősödhetett és megint oda jutottam, hogy bármit mutattam a hálózatnak mindenki beindult az agykéregben. Így ugye nem lehet információt kódolni. A megoldás az, hogy egyrészt a tanulás csak viszonylag gyengén változtassa meg a szinapszisok értékét, másrészt, ha két sejt működése nem egyszerre történt akkor egy picit csökkenteni kell kapcsolatuk erősségét. Az is megoldás lehet, hogy miután a sejt szinapszisait megerősítettük a többi szinapszis értékét annyival csökkentjük, hogy a szinapszisok erősségének összege ne változzon (ezt hívják renormalizációnak). Ezeket a finomhangolásokat az agyban nem a matematikai képletek hangolása, hanem a korábban bemutatott előre és visszacsatolt gátlósejtek végzik. Erről majd sokat beszélünk a harmadik kötetben. Nincs menekvés, ez a szakterületem.

Amikor tanuló hálózatomat sikerült rávennem a jó viselkedésre, sok fontos alapelvet figyelhettem meg. A több száz tanulási ciklus során azt lehetett látni, hogy az agykérgi sejtek receptív mezeje fokozatosan alakul ki, majd ezután már csak kicsit változik. Ezt ugye úgy nézhettem meg, hogy felrajzoltam egy agykérgi sejt melyik retina sejttel milyen erős kapcsolatot alkotott (visszafele).



Egy kérgi sej receptív mezejének változása 1000 tanulási ciklus során.

Az egyes sejtek kezdetben tetszőleges retina sejtekkel lehettek összekötve, majd a tanulás során a retina egy részéhez kezdtek el kötődni, először egy alaktalan foltban, mely lassan egy kövér krumpliból egyre karcsúbbá, majd egy egyenes vonallá vált.



Öt kérgi sejt receptív mezeje, melyek helyzetükben és irányultságukban térnek el.

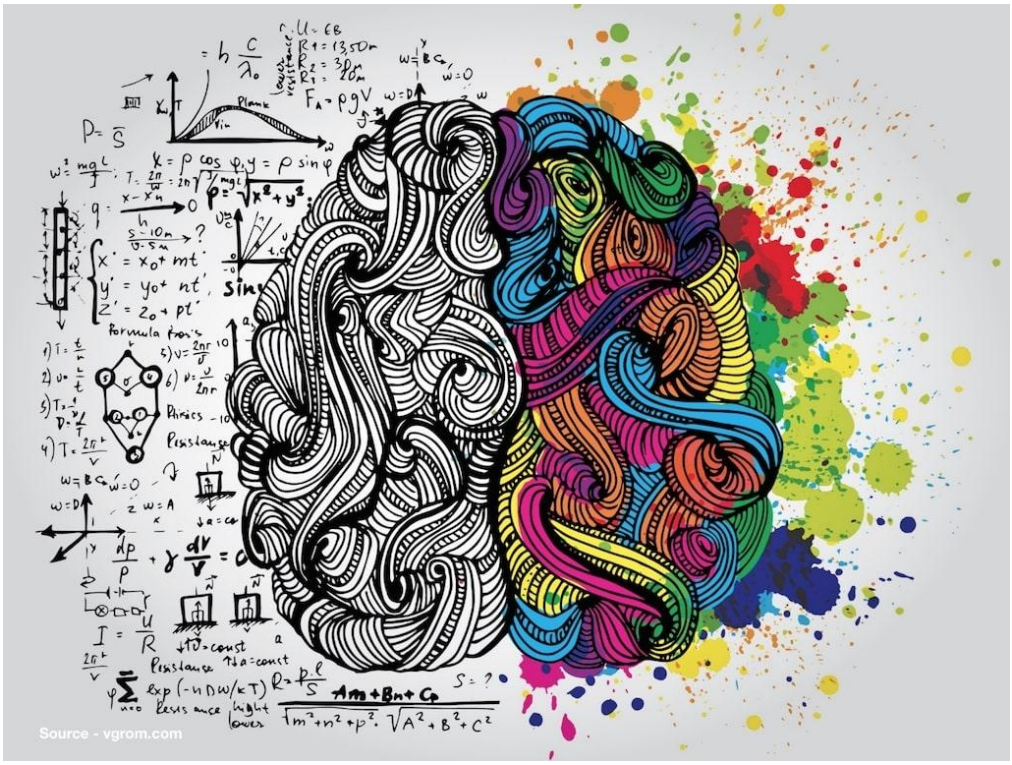
Az egymás melletti „agykérgi" sejtek a „retina" más-más területein más ferdeségű vonalakat érzékeltek azáltal, hogy a megfelelő retinális sejtekkel alakítottak ki kapcsolatokat. A tanítás végére a legtöbb kérgi sejtnek kialakult valamilyen irányú egyenes receptív mezeje.

Ez az első tanulság: egy hálózat a külvilágból érkező információt használja fel ahhoz, hogy megtanulja azokat felismerni.
Ha a modellt a kapcsolatok véletlenre állítása után egy újabb véletlen egyenes sorozattal tanítjuk, a kezdeti véletlen kapcsolatokból megint kialakulnak a receptív mezők, de ezek nem egyeznek meg a korábbi futtatás mezőivel. Ez a második tanulság: azt, hogy egy hálózatban pontosan milyen kódolás alakul ki az függ a hálózatot tanító ingerektől és a tanulás történetétől. Igaz ez ránk is, emberekre, mindannyian egyediek vagyunk egyedi tudással, hiszen más ingerek értek gyerekkorunktól fogva.



Idevágó jelenet a Brian élete című filmből: 'Ti mind egyéniségek vagytok!'

A következő játékban a hálózatot nem egyenesekkel, hanem a „retina" eltérő helyeire vetített eltérő átmérőjű körökkel tanítottam. Nem meglepő módon ilyenkor is kialakultak a receptív mezők, és ezek természetesen kör alakúak voltak. És itt a harmadik tanulság: egy hálózat azt képes felismerni, amivel tanították. Ez ugye megint ismerős, aki sokat foglalkozik a matekkal érteni fogja a differenciál egyenleteket, aki sokat dolgozik ecsettel szépen tud festeni, abban leszünk jók, amit tanultunk és gyakoroltunk.



A matematikus és a művész agyféltekék.

Persze mindeközben szorgalmasan dolgoztam tanuló neuroanatómusként és rengeteg tudományos közleményt, könyvet olvastam. Szembesültem vele, hogy azokkal, amikkel én itt játszogattam, már előttem 30-40 évvel Neumann, McCullogh, Pitz, Kohonen és még sokan mások is eljátszogattak és le is írták korszakalkotó műveikben. Igaz jelentősen butább számítógépeken, de sokkal komolyabb matematikai háttértudással. Hogy mire jöttek rá a

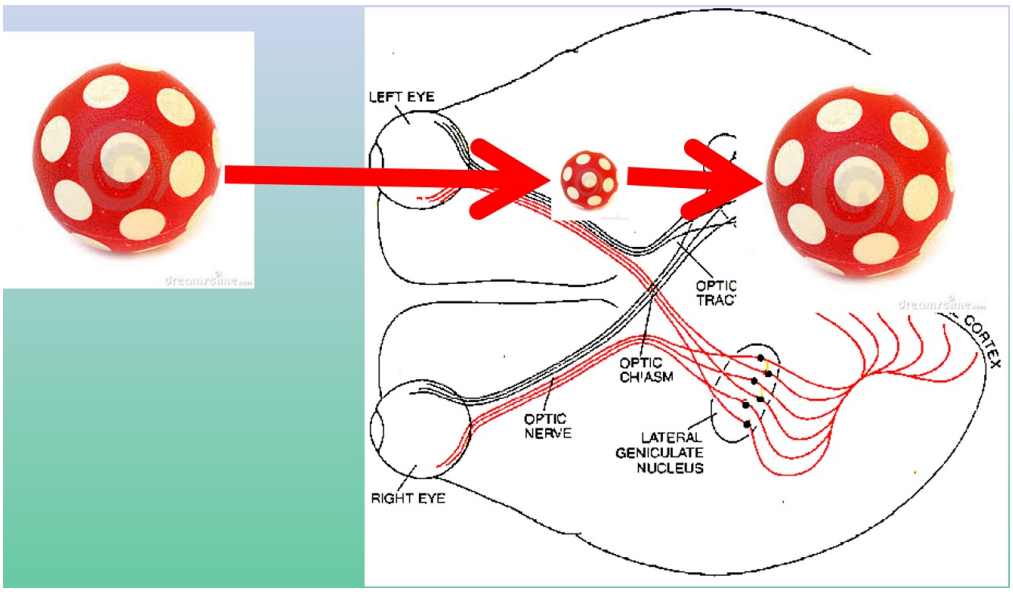
formális neuronokkal (elméleti, matematikailag leírható, egyszerű idegsejt modellekkel) dolgozó szakemberek azt hamarosanboncolgatni fogjuk.

Szerző: **Gulyás Attila**

A visszacsatolás dícsérete: a percepció modern elmélete

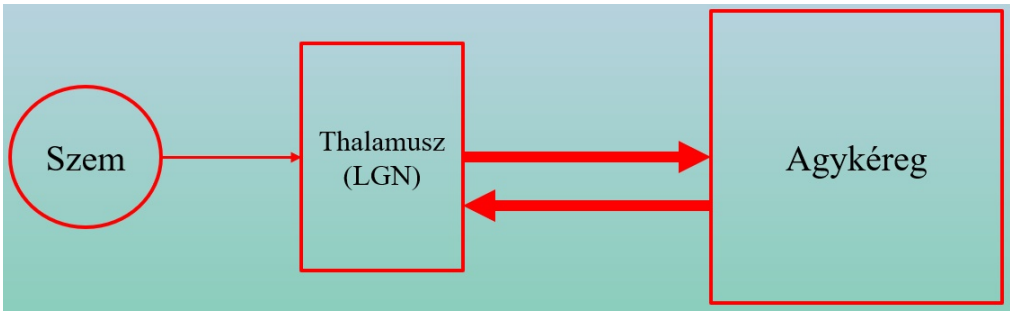
A bejegyzésben azt járjuk körül, hogy az a tény, hogy az agyi idegsejthálózatokban rengeteg helyen figyeltek meg visszacsatolásokat hogyan járult hozzá, a percepció, az érzékelés régi modelljének gyökeres átalakításához.
A bejegyzés egy nagy előreugrás az #agyséta szerveződési szintekre épülő logikájában, de az #agykérdések rovatban hamarosan megjelenő bejegyzések megalapozásához szükség van a belső modelleken alapuló percepció modell bemutatására.

A Macskakölyök Meséjé-ben tárgyaltak és a Mátrix forradalmak bejegyzés egymásra épülő hálózatainak alapján könnyű bemutatni az érzékelés sokáig egyetlen (klasszikus) modelljét. A külvilágból az agyba érkező információt az egymásra épült agyterületek mintázatok formájában adják tovább és dolgozzák fel, miközben kialakul a belső reprezentáció és az információ értelmezdik. Az elképzelés szerint a külvilágból érkező információ teljes egészében felépíti a belső képet, egyirányú az információ áramlása. Hátránya, hogy mindenre úgy néznénk, mintha először látnánk életünkben! Nagy mennyiségű információ áramlását igényli és lassú, keveset tudunk meg az adott tárgyról.



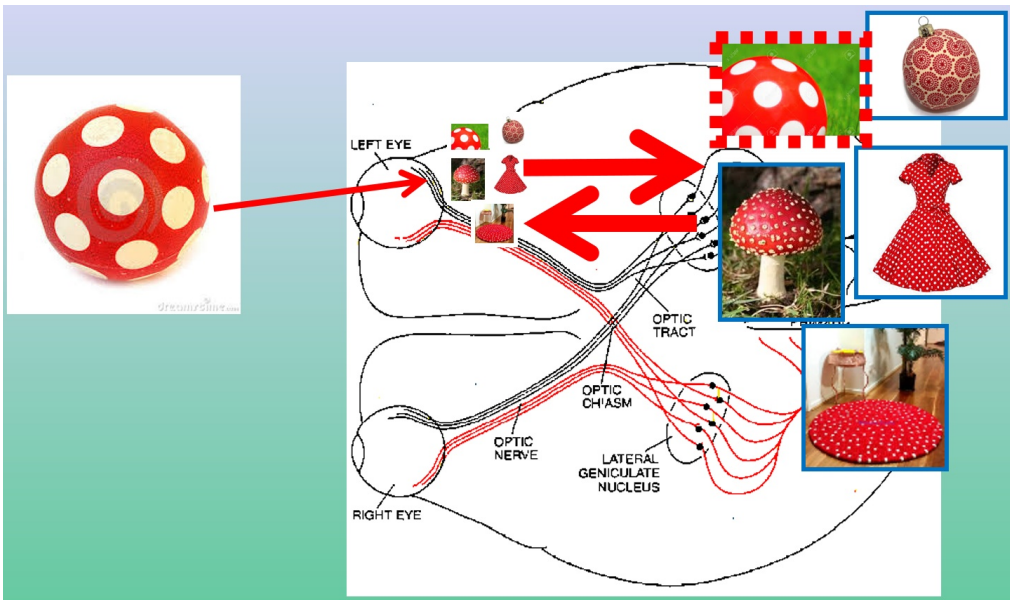
A percepció klasszikus modelljének folyamata

Amikor azonban a látórendszer esetében a kutatók elkezdték részletesen feltérképezni, hogy a szemből a thalamuszon keresztül a látókéregbe kerülő információ pontosan hogyan is áramlik, meglepő tényt figyeltek meg. A thalamuszban ücsörgő átkapcsoló (relay) idegsejtek, melyek a retinából érkező képet továbbküldik a látókéreg felé, nemcsak a retinából kapnak bemenetet, hanem a látókéregből is! Ráadásul sokkal többet kapnak a látókéreg felől, mint a szemből! Azok a sejtek, akik a látókéregbe küldik a szemből érkező jelet, bemeneteiknek csak 10%-át kapják a szemből és 90%-át a látókéregből, arról a területről, ahova ők vetítenek, ahova a jeleiket küldik. Felfedeztek tehát egy igen erőteljes visszacsatolást, információs hurkot a látórendszerben. Ilyen hurkokat még rengeteg helyen lehet találni az agyban, nem csak a látórendszerben.



Az információ áramlása a látórendszer első átkapcsolásai során. Vastag vörös nyilak jelik az agykéreg és a thalamusz közötti erős visszacsatolt kapcsolatrendszert.

És mint az előző bejegyzésekben láttuk a visszacsatolások sokat javítanak a hálózatok működésén, azáltal, hogy elősegítik a mintakiegészítést, asszociációt, a különböző típusú információk összekapcsolását és a tartósan működő belső aktivitásmintázatok kialakulását. A percepció modern elméletnek megalkotásakor mindehhez még hozzávették a Mátrix memóriánál bemutatott szinaptikus tanulást is. Az elmélet azt állítja, hogy életünk során a külvilágból érkező ingerek alapján (kezdetben a klasszikus mechanizmus segítségével) a külvilágról egy belső modell alakul ki visszacsatolt hálózatainkban. A fejünkben rengeteg információ tárolódik, aktív, előhívható formában, hiszen mint az asszociatív két bemenetű hálózat esetében láttuk egy asszociáció egyik eleme képes előhívni egy másikat. Ha az mondod, hogy labda, azt mondom, hogy pettyes és piros és gömbölyű és pattog.



A percepció új elméletének folyamatábrája. A külvilágból érkező információ a visszacsatolt hálózatokban tárolt belső modellek közül segít kiválasztani azt, amelyiket a beérkező inger támogatja. Jelen esetben a piros szaggatott kerettel körülvett pöttyös labdát.

Hálózatainkba rengeteg esetre rengeteg modell aktiválódhat. Amikor valamit érzékelünk, akkor nem alapjaitól épül ki a belső kép, hanem a fejünkben levő egyes modellek közül választunk, annak megfelelően hogy az éppen tapasztalt információ mely modelleket támogatja vagy veti el. Ha piros alapon fehér foltokat látunk az leggyakrabban pöttyös labda, ritkábban légyölő galóca vagy pöttyös ruha, még ritkábban karácsonyfadísz vagy vicces szőnyeg. Ha kevés információnk van (sötét, homályos, gyors) akkor a modellek közül a leggyakrabban előfordulót érdemes választani (ez esetben pöttyös labda), mert nagy eséllyel eltaláljuk. Ha több információt kapunk, például, hogy a dolognak szára van és kalapja, akkor elvetjük a gombán kívül az összes modellt. Amikor kiválasztottuk a nyertes modellt akkor viszont rögtön hozzáférünk korábban eltárolt információihoz. Tudjuk, hogy a labda pattog, focizni lehet vele, hogy fel kell fújni, ha leereszt stb.
Személyes élményem: vendégségbe érkezve gyorsan átsétáltam egy szobán. A szemem sarkában láttam egy piros foltot pöttyökkel. A legvalószínűbb modellt választva be is soroltam labdának. Aztán amikor később kimentem a konyhában több információm lett róla, nem kerek volt hanem lapos és gyűrött, így maradt a piros ruha pöttyökkel. Nem egy világmegrázó változás, de valahogy megmaradt bennem ez az élmény az érzékelés csalókaságáról.

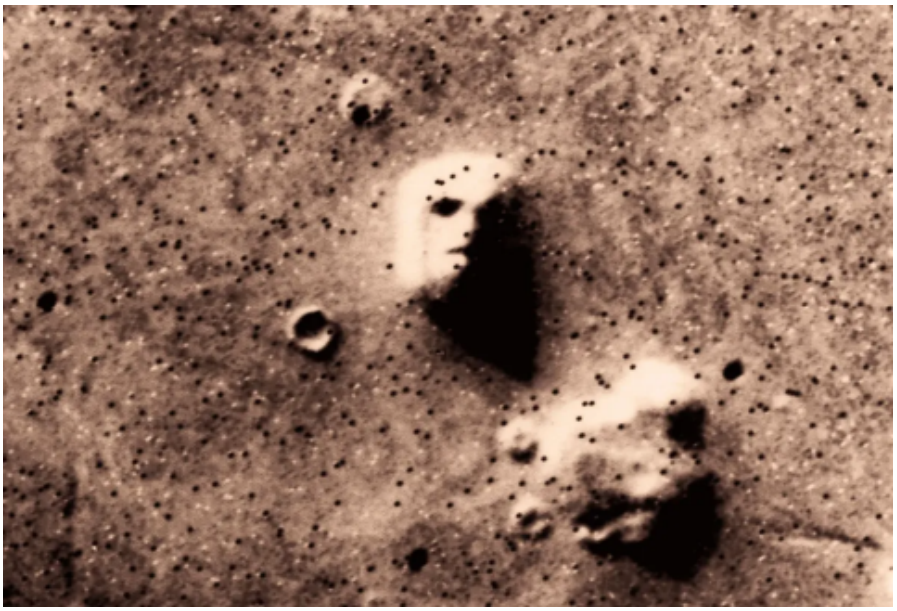


Dali bizarr álomszerű festménye

A belső modellválasztáson alapuló érzékelés modell magyarázatot képes nyújtani az álmokra és a pszichózisok alatt megfigyelt tévképzetekre is. Alvás alatt agyunkba nem jutnak be a külső világ információi, így amikor álmodunk, a fejünkben levő modellek (a visszacsatolt hálózatoknak köszönhetően) válogatás nélkül aktiválódhatnak, hiszen semmi sem köti őket a valósághoz. Álmaink a valóság bizarr változatai. Álmunkban, bekapcsolódó modelljeink a külvilág számos tulajdonságát helyesen mutatják, de nincsenek felfűzve egy külvilágból érkező vezető történetbe. A hallucinációk és tévképzetek is hasonló módon magyarázhatók, ha valaki pszichiátriai vagy neurológiai

betegségben szenved hiányozhat vagy hiányos lehet a belső modellek aktiválását megszűrő külvilágból érkező információ. Egy ilyen beteg nem tudja a valóságot és a képzeletet megkülönböztetni. Nem tudja, hogy amit agya „lát" az most a valóság, vagy csak agyának hibás működése.

Az érzékelés e szerint a modell szerint tehát úg ytörténik, hogy agyunk minden beérkező ingerben mintázatota keres, melyik mintázat utal a lehetséges belső modellek valamelyikére. Nem is keres, hanem illeszt, hiszem nem egymás tán nézi végig a lehetséges illeszkedéseket hanem egyszerre, megnézi milyen minta pottyan át arésen. Mint a kisgyerek aki a különböző alakú elemeket próbája a doboz tetején található lukakba tömni.



A mars felszínenek fényképébe belelátott emberi arc. Más napállásnál már nem látszik.

Az agyi mintázatkeresés annyira erős, hogy látszólag értelmetlen, véletlen mintázatokban is mintázatot, valami korábban tapasztaltra utaló dolgot keresünk. Képeket látunk az utca repedéseiben, a felhőkben, a kávézaccban, ezt hívják pareidolia-nak. Ez kóros esetben aztán messzire vezethet.

Szerző: **Gulyás Attila**

A harmadik elméleti keret: Konnekcionizmus és PDP I.

A második évadnak ez a legfontosabb fejezete. Mielőtt beleássuk magunkat egy nagyon valós idegsejthálózat, az agykérgi modul működésébe, összeszedjük mit tudtunk meg az egyszerű idegsejthálózatkról az eddigi mesékben.

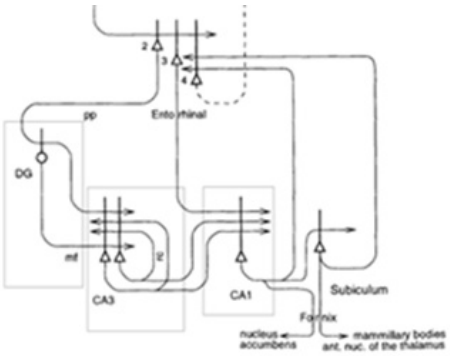
1) Az érzék és idegsejtek aktivitásának mintázatában kódolónak a külvilágból érkező ingerek vagy belső állapotok.
2) Az idegsejtek a több irányból (érzéksejtek, előző idegsejtek) érkező jeleket (ingerületátvivő anyagok által kiváltott szinaptikus potenciálok) összegzik (az elektromos jelek végigterjednek a dendriteken és eljutnak a sejttestre), majd ha a serkentés erőssége elérte a sejt kisülési küszöbértékét, a sejtek jelet küldenek ki axonjukon (akciós potenciál), melyet átadnak az általuk beidegzett számos sejtnek (az axonvégtalpakból átvivőanyag szabadul fel). Két egymás után kapcsolt idegsejt képes egy egyszerű reflex kivitelezésére, ahol egy egyértelmű inger, egy egyértelmű választ vált ki.
3) Az idegsejtek közötti kapcsolatok nem csak merevek, genetikailag meghatározottak lehetnek, hanem az asszociatív Hebb-szabály szerint (mely azt mondja ki, hogyha egy sejt

bemenete és a sejt egyszerre aktív, akkor a kapcsolat erősödik) a kapcsolatok (szinapszisok) erőssége tartósan megváltozhat. Ez, egy a környezethez jobban alkalmazkodó módosítható reflexet eredményez.



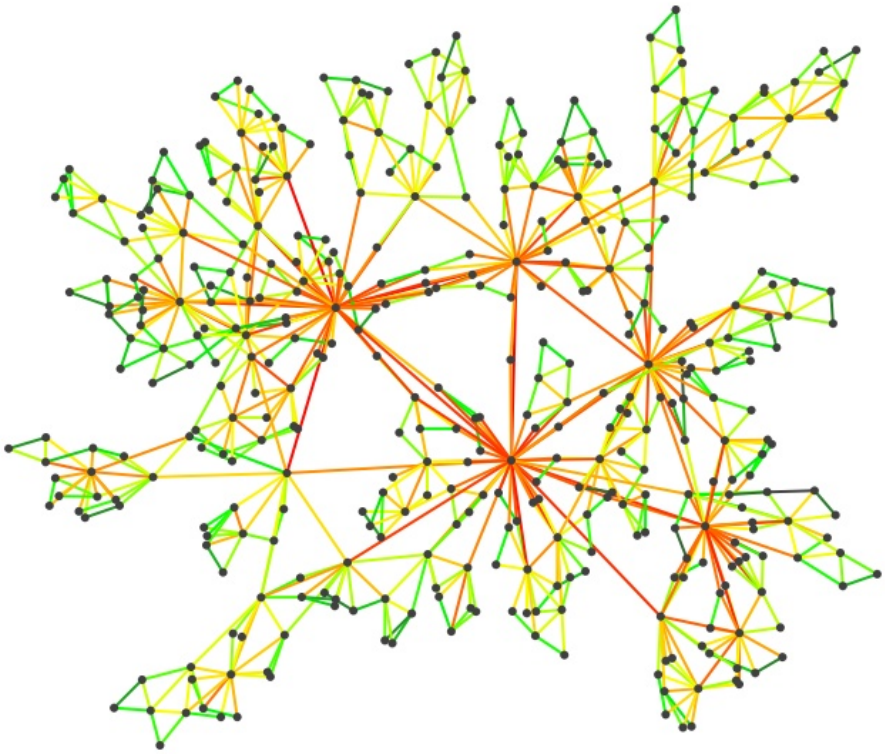
Pavlov kutyája, a társításon alapuló tanulás alapmodellje

4) Ha sok idegsejt egy hálózatba kapcsolódik, a hálózatok, felépítésük, valamint az idegsejtek és kapcsolataik tulajdonsága alapján képesek arra, hogy a beérkező ingermintázatot egy válaszmintázattá alakítsák. A legegyszerűbb hálózat, egy két-rétegű, előrecsatolt hálózat (aminek van bemeneti rétege és kimeneti rétege) képes egy soktényezős esetben egyszerű hatékony döntést hozni. Kicsit elvontabban, mondjuk az érzékszervekből érkező bemeneti mintázatot egy az izmokat vezérlő kimeneti mintázattá alakítja. Ha a hálózat kapcsolatai genetikusan meghatározottak akkor egy ösztönös merev választ képest kiszámítani. Ez jól működik megbízható, evolúciósan hosszútávú esetekben, de nem elegendő változó környezetben.
5) Amennyiben a hálózat módosítható kapcsolatokat tartalmaz, akkor képes a tanulásra, azaz a megváltozó környezethez alkalmazkodva hatékonyabban tud dönteni, illetve a környezet ingereit felhasználva képes magát fejleszteni. Az egyszerű, tanulásra képes hálózatok mintázatokat képesek egymáshoz társítani, asszociálni. Egy vagy több bemenő mintázat hatására a hálózat elő tudja hívni a korábban megtanult válasz mintázatot. Egy hálózat, méretének függvényében akár igen sok mintázat társítást képes megtanulni.
6) Az idegsejthálózatok tartalmazhatnak visszacsatolt kapcsolatokat is, köröket, amikor az információ visszajut a sejtekre. Ezek a hálózatok képesek mintákat kiegészíteni vagy jelsorozatokat előállítani. A hálózatok megfelelő hangolásával (gátlósejtek) a hálózatok képesek lehetnek kategóriákat alkotni vagy pont szétválasztani hasonló eseteket.
7) Ilyen egyszerű, egymás után kötött hálózatok bonyolult többlépcsős feldolgozásra is képesek, a környezetből származó ingerekből különböző típusú információt tudnak kivonni és azt használni



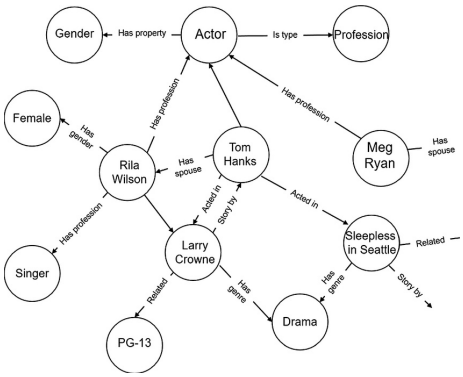
A hippokampusz kapcsolatrendszere. Ez az agyterület több különböző módon kapcsolt alhálózatból áll.

Röviden, egy egyszerű elemekből, és egyszerű tanulásra képes kapcsolatokból álló egyszerű szerkezetű (kétrétegű, előrecsatolt vagy egyrétegű visszacsatolt) hálózat képes mintázat párokat vagy sorozatokat tanulni. A megfelelő bemenetekre a megfelelő kimeneteket előhívni, folytatni vagy akár ismétlődő sorozatokat előállítani. Képes hiányos mintázatok alapján is helyesen előhívni az asszociált mintát vagy ha a mintát magával társították azt képes kiegészíteni. Ha a rendszerben az elemek aktivitási szintjén gátló elemek segítségével hangoljuk, a rendszer a bemenő jeleket csoportokra tudja bontani (klasszifikál, osztályokat alkot) vagy egymástó eltérő mintázatokká alakítja a jeleket (ortogonalizál).
Persze sérülékeny pontjai is vannak. Ahhoz, hogy helyesen hívjon elő információt és ebből sokat tudjon tárolni a bejövő mintázatoknak ritkásnak (sparse) kell lennie, különben hibásan hívja elő, amit tanult. Azaz egyszerre csak kevés eleme (optimálisan <10%) lehet aktív. De ez könnyen megoldható egy jel előfeldolgozó, magas küszöbű elemeket tartalmazó hálózattal. Nézzük meg kicsit matematikusabban, fizikusabban a dolgokat, úgy könnyebb általános alapelveket megfogalmazni és használni.



Egy gráf pontokból (fekete) és élekből (színes vonalak) áll.

Az idegsejthálózatok idegsejtekből és kapcsolatokból állnak. Egy hálózatot a matematikusok GRÁF-nak neveznek. A gráfok pontokból és a pontokat összekötő élekből állnak, ezek felelnek meg az idegsejteknek és a közöttük levő kapcsolatoknak.



Fogalmak közötti kapcsolatok ábrázolása egy tudás gráfon

Az idegsejthálózatokat és gondolkodási folyamatokat leíró, matematikai modelleken nyugvó elmélet neve Connectionism (Konnekcionizmus). Edward Thorndike nevezte el így az 1930-as években azt a megközelítést, amelyik a gondolkodás alapjául szolgáló fogalmakat csomópontokként a köztük levő összefüggéseket élekként ragadja meg. A kép a pszichológusok és nyelvészek azon próbálkozásából fakadt, hogy az elme tartalmát és a szavakat fogalmak és közöttük levő kapcsolatok hálójával (tudás gráf) határozzák meg. Egy dolog jelentését és tulajdonságait az határozza meg, milyen más dolgokkal van kapcsolatban.

Connection = Kapcsolat, azaz a Konnekcionizmust fordíthatnánk Kapcsolat-elméletnek. Ez az elképzelés aztán két hullámban az 50-es (McCulloch, Pitts) és a 80-as években (McClelland, Rumelhart) továbbfejlődött és beolvasztotta az idegsejtek hálózatáról megismert elemeket is, hiszen azok a hálózatok is leírhatók csomópontokkal és élekkel.

A fenti visszatekintésünk újrafogalmazásával megkapjuk **a Konnekcionizmus alap állításai**t:

1. a reprezentáció, a külvilág hálózatban való megjelenése = hálózatok csomópontjainak aktivitás mintázata

2. memória, tudás = az élek erősségének értéke
3. az információ feldolgozása, gondolkodás = a csomópontok aktivitásmintázatának fejlődése az élek erősségének megfelelően
4. tanulás = az élsúlyok megváltozása (mondjuk a Hebb szabály alapján)

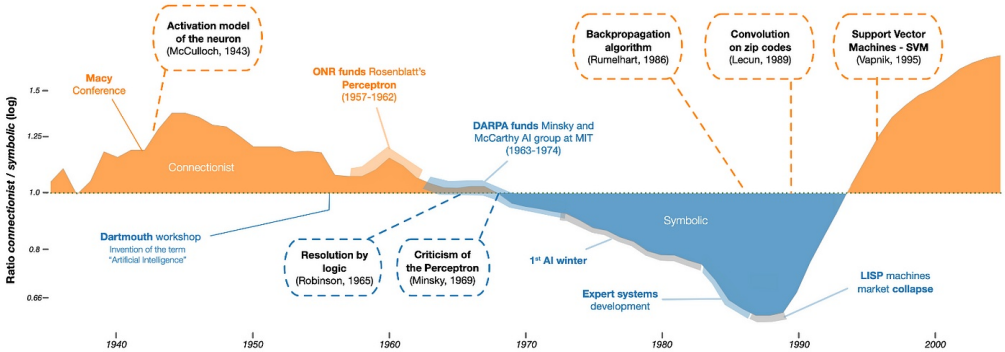
Mindebből az látszik, hogy a konnekcionista hálózatokban:



Jelen, múlt és jövő

- a JELENT (az érzékelteket), a rendszer aktuális állapotát, a csomópontok aktivitása,
- a MÚLTAT (az emlékeket, a tanultakat) a korábban beállt élek (kapcsolatok) erőssége,
- a JÖVŐT (a döntést, gondolkodást) pedig a csomópontok aktivitása és a kapcsolati súlyok összjátéka szerinti aktivitás fejlődése jelenti.

Vegyük észre, hogy a konnekcionista megközelítést az agy megértését kutatók mindkét csoportja, a viselkedést és gondolkodást vizsgáló, a szerveződési szinteken felülről lefelé ásó (lásd első kötet) pszichológusok és megismeréskutatók, de az idegsejteket és a hálózatok működését alulról felfelé vizsgáló idegtudósok is használják. A kettő azonban nem ugyanaz, az első a Konnekcionizmus szimbólikus (jelentés) változata, ahol a csomópontok fogalmak, mindenkori tudattartalmunk a csomópontok aktivitásmintázata, tudásunk a fogalmak közötti élek erőssége, gondolkodásunk az aktivitásmintázat változása, a tanulás pedig az élek változása. Ezt a leírást „relational network", azaz összefüggés hálónak is hívják, hiszen a fogalmak viszonyát írja le. Az asztal csomópontja össze van kötve, a többnyire 4 lába van, mellé lehet ülni, eszünk róla, dolgozunk rajta, bútor, asztalos csinálja, lapos a teteje fogalom csomópontokkal. A mintázatok fejlődése során egy aktív gondolathalmazból (aktivált csomópontok) egy másik gondolathalmazhoz (aktivált csomópontok) jutunk el.



A mesterséges intelligencia témakörében megjelent neuronális (narancssárga) és szimbolikus (kék) tudományos közlemények arányának változása az idők során. Kicsit más a szóhasználat, az ábrán a Connectionist jelzőt a neuronális modellekre használják. Az 1970-90 es években a szimbolikus megközelítés vette át a gyeplőt a neuronálistól, de mostanra a neuronális megközelíts modern formái (DeepLearning) egyértelműen tarolnak.

A másik változatban, a Konnekcionizmus neuronális formájában, egy-egy fogalmat idegsejtek egy-egy mintázata jelent (asztal esetében az 1, 13, 67, és 100. sejt aktív, szék

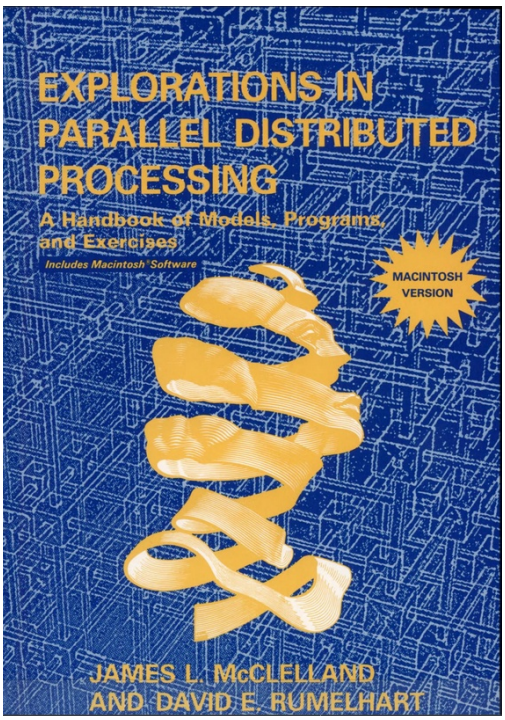
esetében a 45, 67, 83 és 92 sejt), mely mintázatok a kapcsolatok súlya alapján egymásba alakulnak. Ugye az hogy egy neuronális megközelítésben az egyes lehetséges mintázatok hogyan alakulhatnak egymásba a szimbolikus reprezentációval is leírhatjuk (az asztal vagy a széknek megfelelő sejtcsoportok aktívak-e és melyikből melyik lesz), de az ezek közötti megfeleltetést nem tudom vizsgálta-e már matematikus…

A következő bejegyzésben azt is megtudjátok mi a PDP.

Szerző: **Gulyás Attila**

A harmadik elméleti keret: Konnekcionizmus és PDP II.

A Konnekcionizmus második felvirágzását McClelland és Rumelhart 1986-os könyve alapján PDP-nek, Parallel Distributed Processing-nek hívják, ami magyarul annyit tesz Párhuzamos, Elosztott Feldolgozás. Ők itt az idegsejtek és hálózatok matematikai leírást finomították, megjelentek a többrétegű hálózatok, amelyekben a bemeneti és a kimeneti réteg között rejtett (hidden) rétegek is voltak. Illetve rájöttek arra, hogy egy modell idegsejt hálózat jobban működik, ha az idegsejtek küszöbfüggvénye nem lineáris, hanem szigmoid. Ez magyarra fordítva azt jelenti, hogy a sejt kimenete nem egyszerűen a bemenet összegével arányos, hanem a küszöbérték körül jelentősen megnő a kimenet erőssége. Ebbe most ne menjünk bele miért működik a lényeg az, hogy sokat használ.



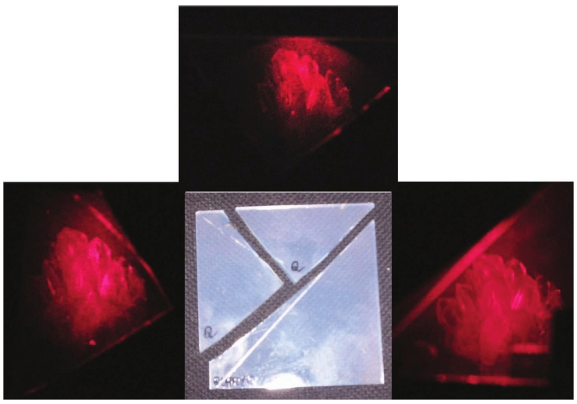
A kultikus könyv borítója

A mozgalom mélyebben és pontosabbam megértette az idegsejthálók tulajdonságait, melyek a nevében is tükröződnek. A Párhuzamos azt jelenti, hogy a működés során nem egyenként értékelődnek ki az egyes idegsejtekre érkező bemenetek és ebből a válaszuk, hanem egyszerre, párhuzamosan, rétegről rétegre adódik át az információ, ráadásul egy többrétegű hálózatban minden rétegpár között egyszerre adódik át az információ. Mint ahogy egy igazán jó focimeccsen is az összes játékos egyszerre mozog, hogy a megfelelő pillanatban a jó helyen legyen, ellentétben egy gombfoci játékkal, ahol mindig csak egyetlen „játékost" lehet odébb pöccenteni. Például egy 4 rétegű, rétegenként 100 sejtes hálózatban egyszerre 300 számítás történik (az utolsó réteg csak kimenet).
Ezzel a megoldással össze is függ a második tag, az Elosztott. Egyrészt elosztott a reprezentáció az idegsejtek, csomópontok aktivitásának mintázatában, másrészt a memória, a tudás a rendszerben a kapcsolatok erősségének összességében található elosztva.

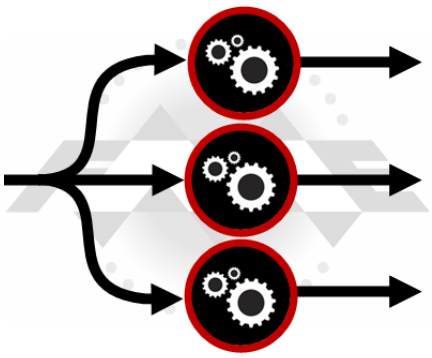
Ennek eredményeként egy PDP hálózatnak vannak, egymással összefonódóan jó és rossz tulajdonságai.

Jó tulajdonság 1: Mivel a reprezentáció és a tudás szétszórt a hálózatban, ezért a hálózat sérülésével arányos mértékben romlik annak működése, azaz robosztus. Ha egy kis része

kiesik, sem a reprezentáció (a mintázatok, melyek a dolgokat jelentik) sem a tudás (a kapcsolatok) nem károsodik jelentősen. Kicsit homályosabb lesz a reprezentáció, kicsit hibás lesz a működés. Lásd a mátrix memória esetében korábban felhozott hologram hasonlatot: a hologram lemezt félbetörve a kép nem tűnik el csak homályosabb lesz.



A 3 fele tört hologramlemez mindegyik darabjáról előállítható az eredeti tárgy, csak elmosódott formában.



Jó tulajdonság 2: a rendszer gyors, mivel párhuzamosan zajlik benne a feldolgozás. Az agy még úgy is gyors, hogy elemei az idegsejtek jelentősen lassabbak, mint egy mikroprocesszorban a logikai elemek (tranzisztorok). Míg egy idegsejt másodpercenkét a legjobb esetben 150 műveletet tud végezni (a legmagasabb, egészséges agyban megfigyelt sejt tüzelési frekvenciája alapján), addig egy logikai elem manapság egy CPU-ban 5GHz körül ketyeg, azaz másodpercenként 5 milliárd műveletet végez. Agyunk egyenlőre, mégis gyorsabb (már nem sokáig) mint a Deep Learning hálózatok.

Rossz tulajdonság 1: Pont mivel a dolgok szétszórtak a rendszerben, nem lehet megérteni mi történik, hogy működik, hol vannak a tudás elemei, milyen lépesekben történik a feldolgozás. De nem csak mi, mint külső szemlélő nem értjük, a hálózat sem érti meg. Ebből fakad a:



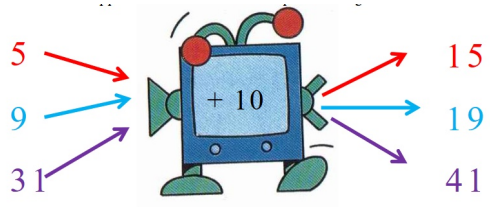
Ha valamit nem értünk, csak másoljuk amit tenni kell, abból baj lesz!

Rossz tulajdonság 2: Mivel a neuronhálózatok példákból tanulnak, asszociációs párokat alkotnak, ezért (lásd az előző rossz tulajdonság) nem értik meg a feladatot, nem bontják elemekre. Ha azt mondod egy, azt mondja kettő, ha már találkozott ezzel a párral. Ennek következményeként nem képesek szabályokat alkotni és azokat használni. Nem tudnak általánosítani abból, hogy 1+1=2 arra, hogy 1+2=3.

Mint az alacsony szakértelmű betanított gyári munkás, ha innen jön a cucc oda kell tenni, de ha valami változik nem tud helyesen dönteni, mert nem érti mit csinál.

Matematikusan fogalmazva a PDP hálózatok nem tudnak függvényeket használni, ahol a bemeneti értékek közötti művelet alapján keletkezik majd a végeredmény, mivel nem

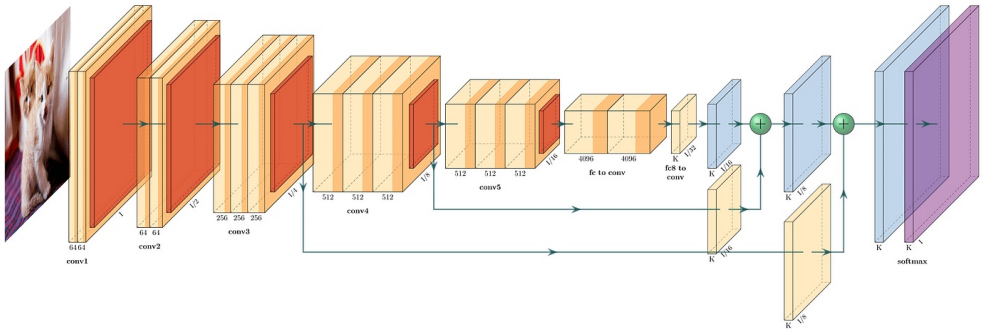
képesek műveleteket végezni. Biztos mindenki emlékszik általános iskolai matekórán a GÉP-re. Ezzel magyarázta el a matektanár a műveletek fogalmát. Bedobok egy számot és eggyel nagyobbat kapok, vagy egy másik gép megszorozza kettővel. Egy PDP háló meg tudja tanulni, hogy 1 után 2, 3 után 4 jön, de ha megkérded mi jön 5 után akkor valamit halangzászni fog, mert ezzel a párral még nem találkozott. Bár egy kellően nagy és mély háló mint mostanában a ChatGPT esetében láthatjuk már ha jól kérdezzük képes erre.



A 'gép' a matek óráról, mely 10-et ad hozzá egy számhoz. No ilyet nem tud egy alap PDP háló.

Ez egy nagyon komoly problémájuk, mert ez alapján nem magyarázható meg hogyan képes az emberi agy logikusan gondolkodni és szabályokat alkotni. Ez volt számomra az egyik legnagyobb fennálló probléma az agyműködés megértésében és közel 30 évig nem tudtam vele mit kezdeni. Az #agyséta során, amikor majd az agyi hálózatok tér és időbeli dinamikáját, valamint a homloklebeny szerepét tárgyaljuk szerencsére fény derül a megoldásra. Spoiler: a dolog megoldása az lesz, hogy a Konnekcionista alapokon nyugvó agyi hálózatok egy magasabb szinten még egyszer többszintű, visszacsatolt hálózatba kapcsolódnak. Ez a meta-hálózat képes lesz a feladatok elemekre bontására.

A fenti probléma vezetett a „Connectionism versus Computionalism" azaz a „Kapcsolatok vagy Számítás" vitához. Jerry Fodor és Steven Pinker elvetették a PDP megközelítést, mivel nem lehetett vele megmagyarázni a logikus gondolkodás és érvelés elemeit, a mentális struktúrák jelenlétét. Ellenállásuk komolyan hozzájárult az „AI winter", az „MI tél" korszak bekövetkeztéhez. Ez alatt a 1980-2010-ig tartó időszak alatt nem sokat haladt a neuronhálózatokon alapuló MI rendszerek fejlődése. Ennek a Konnekcionista megközelítés,



Egy DeepLearning hálózat egymást követő rétegei.

mára mindent tároló formája a Deep Learning vetett véget, mely az agy működéséről időközben szerzett tudásunkhoz visszanyúlva nagyon sok rétegű, hierarchikusan szervezett, elágazó rendszerekbe csatolt neuronhálózatokat használ. A ChatGPt mögött egy 600 rétegű és több millió modell idegsejtből álló hálózat áll. De persze itt is előjön, hogy fogalmunk nincs mi történik ezekben a hálózatokban. Ezért új tudományágak, az AI pszichológus (prompt engineer), AI pszichiáter és AI tanár vannak kialakulóban, melyek megpróbálják megérteni milyen struktúrákban gondolkodnak ezek a hálók és hogyan lehet őket javítani, hatékonyabban tanítani.

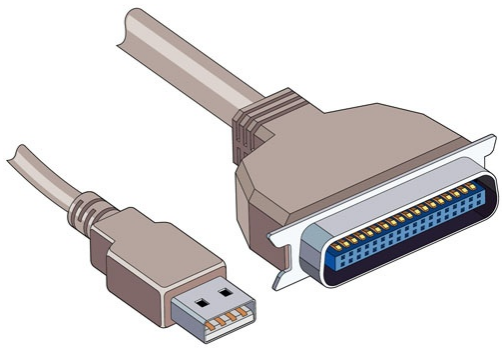
Szerző: **Gulyás Attila**

Soros vs. párhuzamos feldolgozás

Most, hogy átvettük a kétrétegű és a visszacsatolt idegsejt hálózatok működését, tanulási szabályait és hogy mikre képesek, meg kell alapoznunk néhány fontos gondolatot, mert a továbbiakban többször előbukkannak majd és a séta végére, a tudatosság kialakulásának megértésénél szükségünk lesz rájuk.
Az első gondolat, amire fentebb láthattunk példát, hogy egy feladatot többféle, akár teljesen eltérő alapelveken nyugvó módon is megoldhatunk, megoldhat az idegrendszer. Feladata válogatja, hogy melyik esetben melyik megközelítés a hatékonyabb.
A másik, konkrétabb gondolat, hogy a megoldásnak van egy soros és párhuzamos módja.

Mit jelent ez?

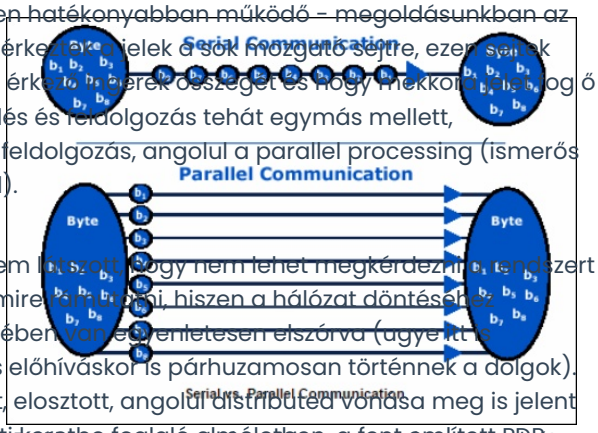
Ha felidézzük a modell örvényféreg fejezetét ott már felbukkant a két megoldás. Amikor először láttunk neki, hogy BASIC-ben klasszikus számítógépes nyelven leprogramozzuk mit is tud egy örvényféreg, a soros megoldást alkalmaztuk, a soronként megírt programot a számítógép soronként, egymás után, SOROSAN hajtotta végre. De ugye itt elvesztünk a labirintusban és felfedeztük, hogy ezt a feladatot egyszerre működő sok idegsejt hogyan képes megoldani PÁRHUZAMOSAN. Értem ez alatta, hogy az érzéksejtektől a jelek egyszerre futottak be a válaszokat kódoló sejtekhez, melyek egyszerre értékelték ki a bemeneteket és egyszerre válaszoltak, azaz a jelek párhuzamosan futottak az axonokon és párhuzamosan kerültek kiértékelésre. Ez jelentősen egyszerűbb megoldás volt és mellesleg gyorsabb is. Azt lehet mondani, hogy a modell idegsejtek számával összefüggésben gyorsul a feldolgozás.



Egy modern USB kábel (bal) és egy dinoszaurusz nyomtató kábel a múlt századból (jobb)

A soros, párhuzamos kifejezések (serial versus parallel) ismerősek lehetnek az idősebbeknek még az USB előtti korból. A nyomtatókat lehetett soros és párhuzamoscsatlakozón keresztül is hozzákötni a számítógéphez. A soros kábel vékony volt és lassan ment rajta az információ, a párhuzamos kábel vastag és meglehetősen sok információt vitt át. A párhuzamos kábelben 16 vagy 32 szál (+2-3) vezeték volt, amin egyszerre (párhuzamosan) mentek át a byteokat alkotó bitek. A soros kábelben meg csak 4 szál drót van, ebből 2-őn mennek az adatok, a biteket ezeken kell egymás után átküldeni. Azaz 16-32-szer lassabban megy át az információ. Az idő közben persze haladt, a technika fejlődött, felgyorsultak az áramkörök és fejlődtek a hibajavító algoritmusok, így ma leggyakrabban a vékonyka USB kábelt lengetjük. Jelentése Universal Serial Bus, azaz Általános Soros Adatátviteli Csatorna (ÁSACS 😊), és mint ebből kiderül ezek is egyenként küldik át a biteket, csak nagyon nagy gyakorisággal (frekvenciáva). No ennyit mára a számítástechnika híreiből. Térjünk vissza az agyra, ott hol van mindez.

A második - a fenti feladatban jelentősen hatékonyabban működő - megoldásunkban az érzékelő idegsejtektől időben egyszerre érkezett jelek a sok mozgató sejtre, ezen sejtek mindegyike egyszerre számította ki a rá érkezett bérek összeget és hogy mekkora a dolog ő ezek alapján magából kiadni. A jelterjedés és feldolgozás tehát egymás mellett, párhuzamosan futott. Ez a párhuzamos feldolgozás, angolul a parallel processing (ismerős lehet az előző #agyséta bejegyzésekből).



Elül a soros megoldás, a bitek egyenként mennek át a kiszelen, alul pedig a gyorsabb megoldás, amikor sok bit mindegyike egyszerre megy a naki kendelt dióton. Az egy kapcsolatai az utóbbi megoldást alkalmazzák, szemben egy klasszikus Turing-Neumann számítógép központi processzorával.

A dolog hátránya azonban az, bár ott nem lehetett, hogy nem lehet megkérdezni a rendszert miért csinált valamit úgy ahogy! Nincs mire kiadni, hiszen a hálózat döntésében szükséges tudás a szinapszisok erősségében van egyenletesen elszórva (ugye itt a párhuzamos a rendszer, a tanuláskor és előhíváskor is párhuzamosan történnek a dolgok). Az információ ezen egyenletesen elszórt, elosztott, angolul distributed vonása meg is jelent az idegsejthálózatok működését elméleti keretbe foglaló elméletben, a fent említett PDP-ben. Jelentése Parallel Distributed Processing. Ha a számítógépes programunk alapján viselkedő alkatrákkal nem vagyunk megelégedve akkor hosszas fejvakarás után megtalálhatjuk a kódban mit kell kijavítani, de egy párhuzamos neuronhálózatban már nehezebb rámutatni hol a rossz értékű szinapszis. Legfeljebb a hálózat újra-tanításával érhetünk el változást. Ezekkel a problémákkal szembesülnek is a Deep Learning hálózatokat használó szakemberek, akiket kuncogva egy új szakma az A-pszichológusok képviselőjének tartok.



Logikai kapuk hálózata (ÉS, VAGY, KIZÁRÓ VAGY), mely matematikai műveletek elvégzésére képes. Feynmann hasonló hálózatba szervezte a stadinban ülő embereket, akik közül egyik sem volt tisztában azzal milyen feladat megoldásának részese.

A mindig tréfás és ötletektől sziporkázó Richard Feynman egyik ötlete, melyről a „Tréfál Feynman úr?" című könyvében olvashatunk a Human Computer Project volt az 1950-es években, a Caltech-en (California Institute of Technology). Összeszedett egy stadionra való embert, mindegyiküknek megmondta, hogy a szomszédjaitól kapott 0 vagy 1 információn milyen elemi logikai műveletet végezzen el és kinek adja tovább a végeredményt. Igazából egy számtógép processzorának a chip-jén lévő logikai kapukat alkotta meg emberekből. A stadion egyik végén kettes számrendszerben reprezentálva az emberek kaptak egyeseket és nullákat, a stadion másik végén, hosszú idő után pedig megjelent a művelet eredménye. A dolog azért jön ide, mert, mint ahogy egy neuronhálózatban sem lehet tudni hol, mi történik a feldolgozás alatt, itt se tudta senki, hogy mit csinált, mégis a játék végére megjelent a végeredmény!
A soros / párhuzamos kérdésben van még egy bejegyzésre való. Ezzel folytatjuk legközelebb.

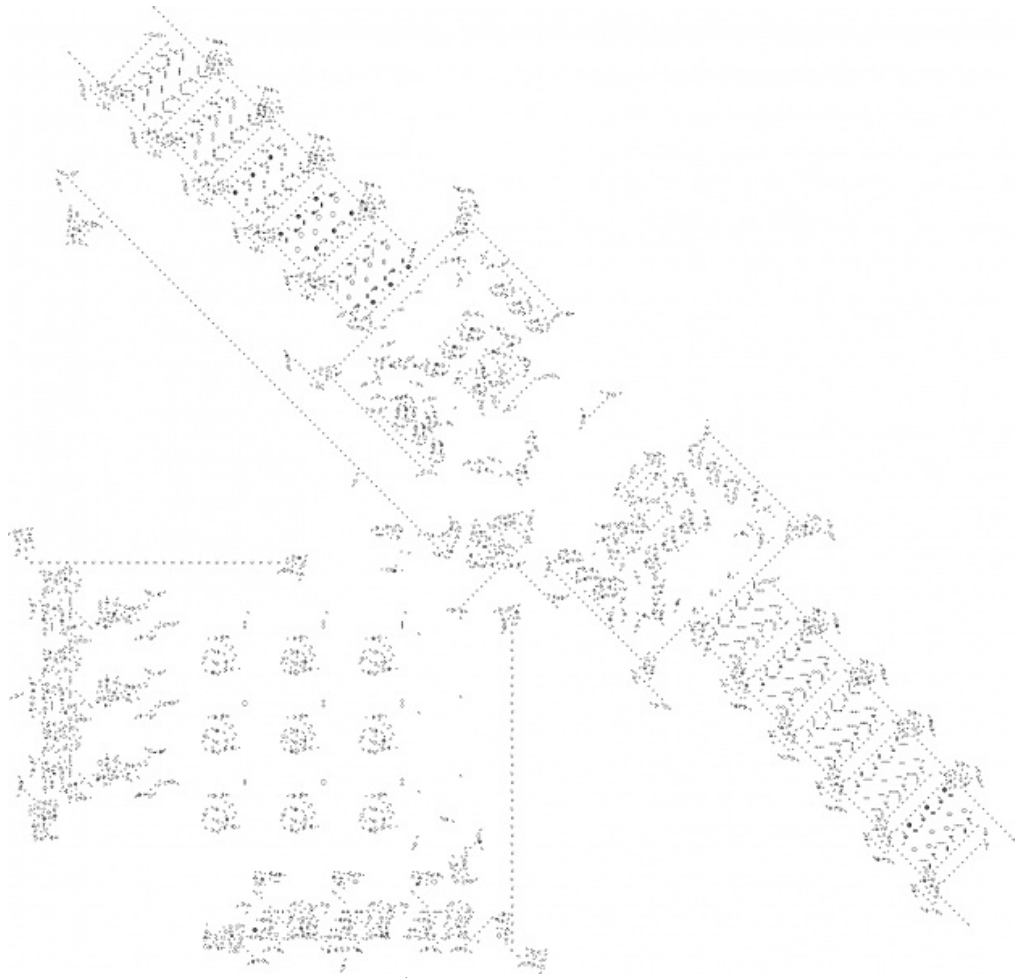
Szerző: **Gulyás Attila**

Soros és párhuzamos egymás tükörképei

***„No de hát az örvényféreg esetében a gyors, párhuzamos megoldást végül is sikeresen leprogramoztuk soros feldolgozáson alapuló számítógépes nyelven!"* – mondja a gyors észjárású kötekedő. Igen, ez a harmadik fontos gondolat: a soros és a párhuzamos**

megoldás átalakítható egymásba. Egy soros feldolgozás megvalósulhat egy párhuzamos rendszeren és fordítva. Agyunk ezt a megoldást használja is majd a logikus, tudatos gondolkozás létrehozásához.

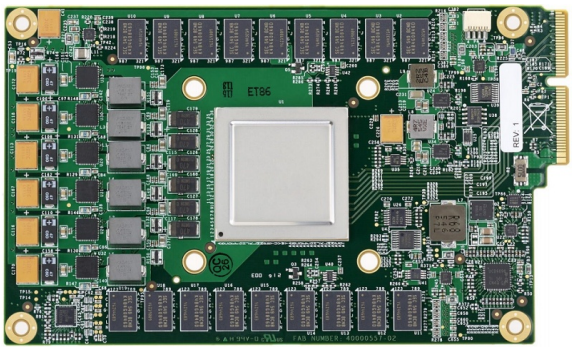
A fenti átalakíthatóságot, ekvivalenciát, Turing bizonyította is, amikor megalkotta a sejtautomatákon alapuló általános számítógépek elméletét. A sejtautomaták bár párhuzamosan működnek, létre lehet rajtuk hozni egy parancsokat sorosan értelmező, programokat és ezáltal logikai kiértékeléseket végrehajtó számítógépet, mely minden feladatot meg tud oldani amire programot lehet írni (aza algoritmizálható).



Turing gépként működő sejtek az Életjáték nevezetű sejtatutomatában. Bonyolult és finom szerkezet, hasonlít egy biológiai struktúrára

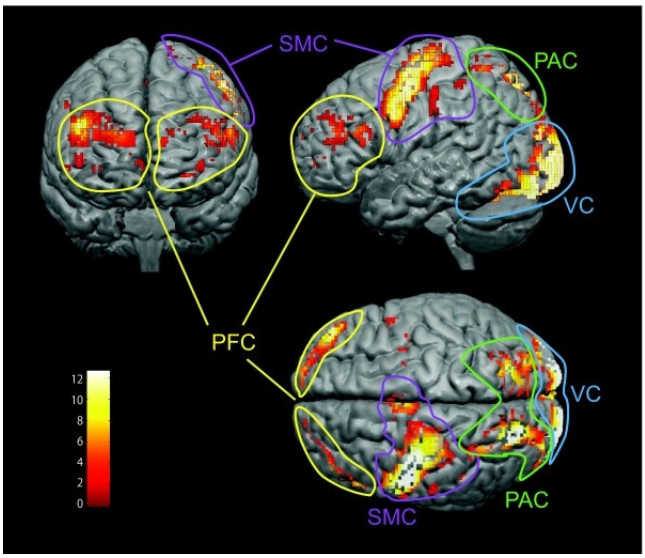
A két megoldás tehát egyenlő (az már egy másik kérdés, hogy irgalmatlan különbségek vannak a sebességben). Azaz fordítva is igaz az átalakíthatóság, egy sorosan, programokat futtató rendszer is képes párhuzamos rendszereket, például a híres Életjáték sejtautomatát futtatni. Ennek számtalan változata érhető el és telepíthető otthoni számítógépeinkre . Fejlettebb verziói azt is lehetővé teszik, hogy nyilvánosan elérhető szerverekről letöltsünk mások által létrehozott induló sejtmintázatokat és azokat futtassunk. Történetesen valaki vette magának a fáradtságot es egy működő Turing gépet hozott létre az Életjátékban. Ez egy hatalmas szerkezet 36549 sejtből áll és egy 1700x1700-as térben fut. Ennek megfelelően igen lassan futhat, hiszen minden lépéshez ki kell értékelni az 17002 elemet, ami közel három millió kiértékelés, kb. 30 millió feltételvizsgálat. Ez persze már egy kissé réteg ízlés, hogy egy Turing gépen -soros számítógépünkön- futtassunk egy programot, mely az Életjáték párhuzamosan működő sejtjeit szimulálja, amik nekünk majd egy Turing gépet szimulálnak. Egy egyszerű egész szám összeadás, amit számítógépünk CPUja (processzora) 0.38 nanosecundum alatt elvégez a szimulált Turing gép számára becslésem szerint 2-3 napra

lenne szüksége (de lehet, hogy ennél több időre). Szóval látszik, hogy bár elméletileg a két megközelítés ekvivalens, gyakorlatilag az időteher miatt mégsem. Ennek ellenére kihasználtuk ezt a SOROS-PÁRHUZAMOS egyenlőséget amikor az örvényféreg program esetében a párhuzamos feldolgozást egy, soros számítógépünkön futó egyszerű kóddal számítottuk ki (egyenlet 1) ami igazán elvégezte a párhuzamosítást. Mivel itt aprócska sejthálózatról volt szó, a kód gyorsan tudott futni.



A Google által fejlesztett mesterséges neuronházatok futtatására alkalmas TPU. Párhuzamosan, rengeteg szálon futnak benne a számítások, mint agyunkban.

Nem így van ez a sokrétegű Deep-Learning hálózatok esetében, ahol már nagyon sok sejtet kell modellezni. Egy rutin PCn egy komolyabb tanulóhálózat tanítása igen sokáig tartott. Aztán rájött valaki, hogy a számítógépes játékokhoz fejlesztett videokártyák, amikbe rengeteg viszonylag buta processzort építettek - hogy ezek mindegyike a kép egy részletét számolja, PÁRHUZAMOSAN – remekül használhatók mesterséges neuronhálózatok futtatására. El is kezdték használni őket erre a célra, amire persze rámozdultak a videokártya gyártók és kimondottak mesterséges neuronhálózatok modellezésére alkalmas több száz vagy akár több ezer párhuzamosan dolgozó processzorokat használó kártyákat fejlesztettek, a TPU-kat (Tenzor Processing Unit). Azaz az eredetileg sorosan működő számítógépekben megjelentek párhuzamosan működő elemek.

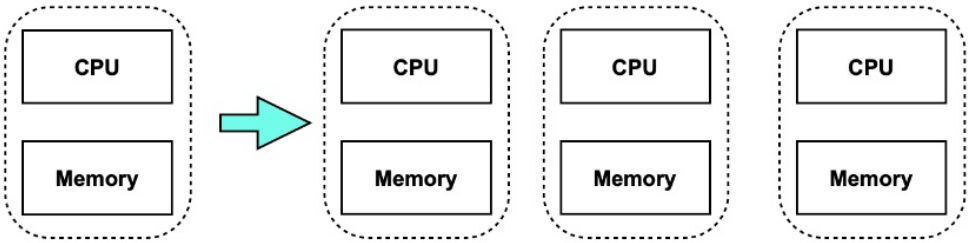


A prefrontális kéreg szervezi a párhuzamosan működő agyi területek kölcsönhatását lépésenként (sorosan) működő feledatmegoldó gondolodássá.

Lassan eljutunk oda, mi miatt is vakartam én a fejemet 30 évig? Amiatt, hogy a konnekcionista hálózatok nagyon szépen leírják az érzékszervekből érkező jelek hatékony és párhuzamos feldolgozását, sokféle tanulást és memória előhívást az agyban, de a tudatosan, lépésenként, algoritmikusan végzett emberi gondolkodás (serial, soros) nem lehet ilyen módszerekkel elképzelni. Ott elvont fogalmakkal végzünk műveleteket, olyanokkal is, amikkel még sosem találkoztunk. Erre pedig a PDP hálózatok nem képesek, hiszen példákból tanulnak és nem képesek szabályokat létrehozni és használni. Mint majd azt a tudatosság kialakulásáról szóló negyedik részben látni fogjuk, az emberi agy prefrontális kérge (homloklebeny) úgy tűnik képes arra, hogy az adódó feladatok függvényében a feladatok megoldása során megfelelő sorrendben összekösse az agykéreg alacsonyabb szintű, párhuzamosan működő területeit, és ezzel egy soros feldolgozást valósítson meg, mely szükséges az algoritmikus, lépésekből álló gondolkodáshoz, az érveléshez és logikához. Azaz, hasonlóan ahhoz ahogy soros számítógépeinkben megjelentek a párhuzamosan dolgozó modulok, az eredetétől fogva párhuzamosan dolgozó agyban is feltűnt egy modul,

mely sorban, algoritmikusan képes meghívni a párhuzamosan működő agyi feldolgozó területeket átadva nekik az előző kör eredményeit.

Van még egy fontos különbség a klasszikusan sorosan működő számítógép és a jórészt párhuzamosan működő agy felépítése között. Neil Gershenfeld az MIT professzora azt mondja, Turing és a sokak által a XX. század Einstein után legnagyobb elméjének tartott Neumann János, nagy hibát vétett, amikor a számítógépet megtervezte. A számítógépben ugyanis a műveleteket végző processzor (CPU) és a memória elkülönül. A számítási idő



Baloldalt egy klasszikus elkülönült számító egységgel (CPU) és memóriával rendelkező számítógép diagramja. A fejlődés a többmagvas processzorok felé haladt, amelyek mindegyike saját memóriával rendelkezik. Ennek a fejlődési sornak a végén állnak az idegsejtek, ahol minden egyes számító elem (sejt) saját memóriával (szinapszisok) rendelkezik.

jelentős részét a processzor azzal tölti, hogy a memóriából vagy a memóriába lapátolja az adatokat. A modern processzorokban az adatmozgatás csökkentésére manapság már gyorsabb cache memóriákat és cache vezérlőket használnak, de a problémát ez csak részben orvosolja. A neuronhálózatok esetében viszont a feldolgozás és a memória együtt történik és ugyanott található. A „műveleteket" az idegsejtek dendritjei és sejtteste végzi, a memória pedig a szinapszisok erősségében tárolódik. Ezáltal még a viszonylag lassúcska idegsejtek is képesek egy gyors agyi feldolgozás megalapozására. És ugye ez is distributed, elosztott feldolgozás, hiszen az adatok a számítási struktúrában vannak elosztva, szétszórva.

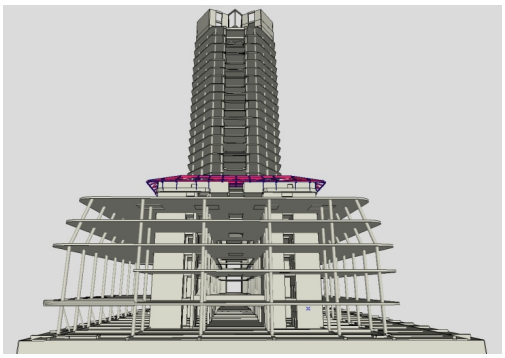
Szerző: **Gulyás Attila**

Az űrhajós meséje: a biológia tervrajz helyett programot használ

Elő a túracipőt, folytatódik az agyséta!

A jelenség, ahogy a látórendszer nagyon egyszerű szabályok alapján felépíti magát a környezetből származó, megbízható ingerek alapján (lásd A macskakölyök meséjét) általános a biológiában. De egy bonyolult szervezetet nem is lehetne másképp előállítani. Az emberi DNSben 3 milliárd bázispár van, ennek információ tartalma bitben számolva $6x10^9$. Ha ezt összehasonlítjuk az emberi agyban található szinapszisok számával, ami 10^{15}, akkor az a teljesen valószínűtlen szám jön ki, hogy egyetlen bit genetikai információ kb. 1 millió szinapszis felépítését kódolná.

Nyilván a dolog nem úgy működik, hogy a genom pontosan megmondja mi hova kerüljön, mint egy felépítendő ház esetén a téglák a tervrajzon. Inkább úgy működik, mint amikor a mesternek megmondjuk, hogy egy 2 emeletes házat szeretnénk egy bejárattal és szintenként 4 ablakkal. Ő pedig tapasztalata és józan esze alapján ezt felépíti. Egy műveletsorozatot, egy programot hajt végre. A programok, ha jó bemeneti értékeket kapnak helyesen működnek, ha rosszakat akkor rosszul.
Az 1970-es években Föld körüli pályán súlytalanságban hosszabb időt eltöltő űrhajósok története remek bizonyítéka annak, hogy szervezetünk a külvilágból érkező információ alapján (genetikai) programokat használ testünk felépítésére. Amikor az első hosszasabb űrutazások (több mint 1 hét) elkezdődtek, az űrhajósokat igen szigorúan vizsgáló orvosok azt



A MOL épületének tervrajza, pontosan meghatározott sztruktúra, szabályosan elhelyezett szintekkel.

tapasztalták, hogy a súlytalanságból visszatérő utazók izomtömege jelentősen csökkent, és csontjukból nagyon sok kalcium veszett el. Egy hetekig tartó űrutazás után napokba tellett, mire az űrhajósok lábra tudtak állni.
De mi is történt a világűrben? A súlytalanság a testsúlyunkat okozó gyorsulás hiánya. Mivel az űrhajósok szabadon esnek a Föld körüli pályán, a testüket nem érik a megszokott erők. Az izmaiknak nem kell megfeszülnie a, csontjaiknak nem kell tartania. Az izmokat és csontokat felépítő programok gyorsan reagálnak, az izmok leépülnek a csontok erőssége csökken. Még csak rossznak sem mondhatók a programok, mert takarékosságra formálta működésüket az evolúció. Az izmok felépítése és a csontok fenntartása drága, fehérjék, ásványi sók kellenek hozzá. Ráadásul nehezek, feleslegesen cipelni őket szintén energiapazarlás. Ezért mindig annyi csontunk és izmunk van amennyit a terhelés alapján a szervezetünk elegendőnek talál. Amikor barátaimmal a hegyekben túráztunk, utoljára mindig az a társunk ért fel a hegyre, aki feleslegesen cipelte magával felfelé 1500 méter szintet, a konditeremben hatalmasra gyúrt, de hegymászásban csak teherként megjelenő kidagadó izmait. A súlytalanságban megszűnik a terhelés, az izmok és a csontok nem érzik szükségét, hogy erősödjenek, elkezdenek tehát leépülni. A kezdeti ijesztő tapasztalatok óta a nemzetközi űrállomáson tartózkodó személyzet minden tagja naponta 2 órát végez tornagyakorlatokat, rugókkal és gumiszalagokkal működő edzőgépeken, és még így is csökken izom és csonttömegük mire visszatérnek a Földre.

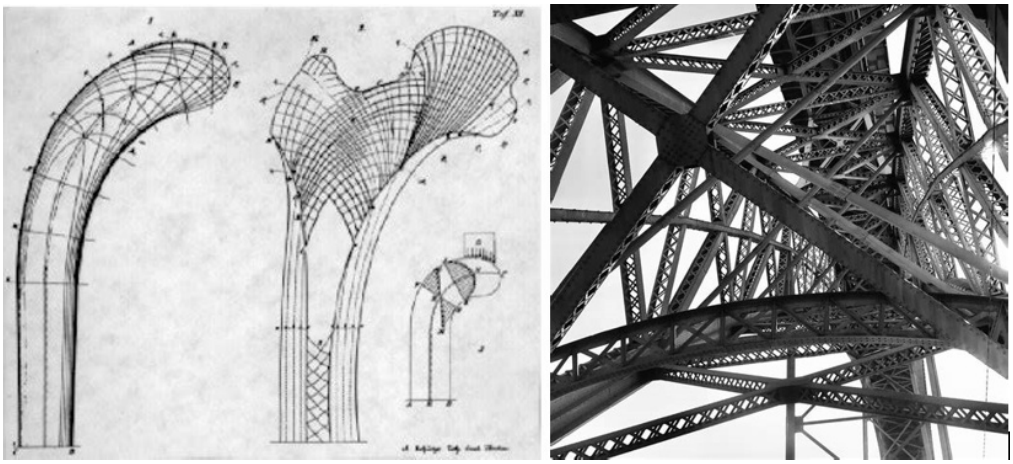


Egy hangyaboly járatrendszerének öntvénye. A hangyák testmérete és az utódnevelés igényei határozzák meg a fokozatosan növekvő struktúra alakját.



90 nap után az űrből visszatérő kínai űrhajósok. Pár napig feküdniük kell, mire szervezetük alkalmazkodik a földi gravitációhoz.

A csontok esetében nem pusztán csak csonttömegről és Ca2+ beépülésről van szó. A csontban osteoblast és osteoclast elnevezésű sejtek találhatók, melyek építik, illetve lebontják a csontszövetet. A terhelés és az erők iránya által szabályozott versengésük eredményeként a csontnak azok a részei erősödnek, ahol a legnagyobb nyomó és húzóerők ébrednek. Valahogy úgy működik a dolog, hogy terheléskor, helyileg, olyan anyagok szabadulnak fel, melyek az építő sejtek működését gyorsítják, a bontókét pedig lassítják. Így, csak oda épül be csont, ahova kell. A combcsont csípőízületében hihetetlen finom hálózatban található csontgerendák (trabekulák) művészi elrendeződését az Eiffel torony szerkezetéhez szokták hasonlítani (helyesen az Eiffel tornyot kellene a csonthoz hasonlítani).



aloldalt a combcsontban a növekedési program által kialakított csontgerendák hálózata. Jobb oldalt a számítások alapján tervrajzba álmodott Eiffel-torony tartóhálózata látszik. Mindkettő légies és minimális anyagfelhasználással maximális erősséget ad.

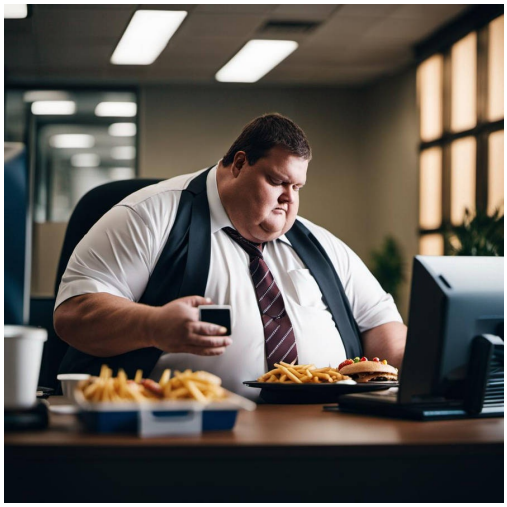
Nem csoda a hasonlóság, hiszen Eiffel is csak azokra a pontokra helyezett tartókat, ahol erők ébredtek. Azt, hogy a csontgerendák az erők hatására alakulnak, jól látszik a fejlődő emberi csontozaton. Amikor a kisbabák kúszásból mászásba, majd onnan járásba váltanak életük első két éve során, a terhelés iránya megváltozik csontjaikban, és ezt követi a csontgerendácskák elrendeződése is. Ez a dinamikus építő-bontó versengés évente csonttömegünk 25%-át lecseréli. Míg az Eiffel torony úgy épült, hogy mind a 18.000 tartóelemnek és az őket összekötő szegecseknek meg volt a helye a tervrajzon, és ebből lépésenként épült fel a torony, mely változatlan formában áll azóta is, addig csontunkban, a két sejtcsoport versengését a bennük futó programok irányítják, a testünkre ható gravitációtól származó információk alapján. Az állandó toronnyal szemben csontozatunk folyamatosan átépül a fellépő erőknek megfelelően, és így új helyzetekhez is alkalmazkodni tud (mint láttuk, a világűrben nem biztos, hogy jól).



A rossz ingereket kapó bennünket alakító programok jó példája a tömeges elhízás. Őseink evolúciójuk alatt kemény körülmények között éltek, ezért minden csepp zsírt, minden nyalás cukrot és minden pehely sót el kellett fogyasztaniuk. Ezért ma is vágyunk a cukor, zsír és só után. Annyit eszünk belőle amennyit tudunk (ez korábban jó stratégiának bizonyult). De mivel ma ezek a dolgok korlátlan mennyiségben kaphatók a boltban, korlátlan mennyiséget fogyasztunk belőle,

Egészséges testalkatú khoisan vadász

melynek eredménye elhízás és cukorbetegség.



A táplálkozási programot rosszul futtató irodai munkás

Hasonló környezeti ingerekre válaszoló programok alakítják talpunk bőrkeményedését, napsütésre barnuló bőrünket és megnövekedett vörösvértest számunkat, amikor egy magas hegyen túrázunk. De elég, ha ránézünk egy fára, aminek szomszédja kidőlt. Az elérhető fényre a fa úgy reagál, hogy abba az irányba gyakrabban ágazik el és az ágak is gyorsabban nőnek. Hamarosan betölti a felszabadult rést, növekedése meglassul.

Összefoglalva: az élőlények tehát kevés, DNS-ben kódolt információt, az evolúció által csiszolt fejlődési programokat, nem pedig tervrajzokat örökölnek őseiktől. Ezek a programok a környezetből származó, állandónak feltételezett ingerek információtartalmát felhasználva alakítják ki összetett szervezetüket. Azonban, mint ahogy egy öröklött tulajdonság is csak a mindenkori környezettel összemérve lehet jó vagy rossz, a genetikai programok is csak a megfelelő környezetben alakítanak ki megfelelő szervezeteket és működést.

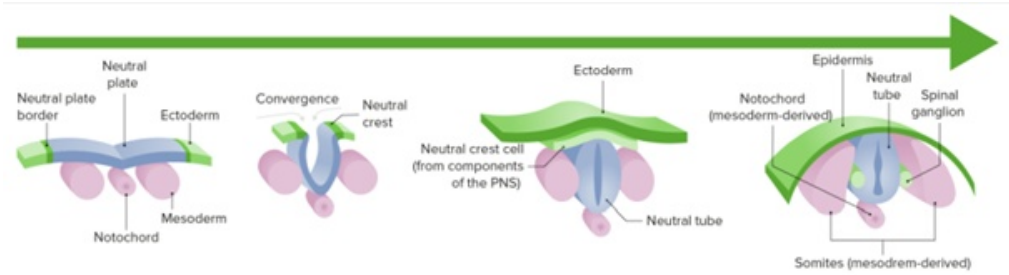
Legközelebb az agyfejlődés esetében mutatjuk meg hogyan is fut a program.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agyfejlődés programja I.: idegsejtfejlődés, kapcsolatépítés

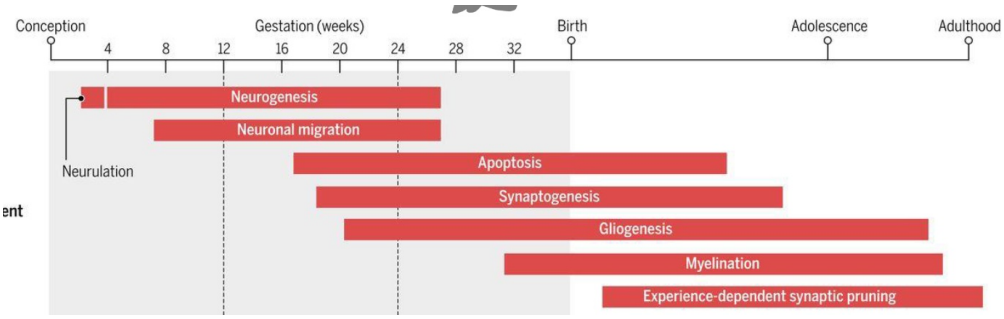
Az agyfejlődés bizonyos elemeiről már beszéltünk korábban. Az agyfejlőd kettő, eltérő program alapján futó fázisra osztható:
1) az idegrendszer felépülése, az agy anatómiai fejlődése a genetikai program alapján, mely felhasználja a test többi részéből érkező kémiai és szomszédsági információkat. Ez elsősorban az embrióban és a magzatban zajlik, de emberben kamaszkorig eltart.
2) a szinaptikus kapcsolatok érése, a tanulás, mely a fejlődő idegrendszer által létrehozott jelek és a külvilágból érkező információ alapján, a Hebb szabályt felhasználva alakítja ki a szinapszisok erősségét, és tünteti el a felesleges kapcsolatokat. Ezek a folyamatok születés után indulnak be igazán és életünk végéig tartanak. A legnagyobb átalakulás kisgyermek és kamaszkorban történik.

Anatómiai fejlődés: Az embrió fejlődésének egyik korai és meghatározó lépése a velőcső lefűződése, ebből alakul az idegrendszer és ez szervezi a test kialakulását is. A kialakult cső feji részén aztán megjelennek az agy tájait kialakító agyhólyagok, melyeknek falában az osztódó sejtek létrehozzák a gliasejteket, majd a neuronokat, melyeknek vándorlását az előbbiek irányítják.



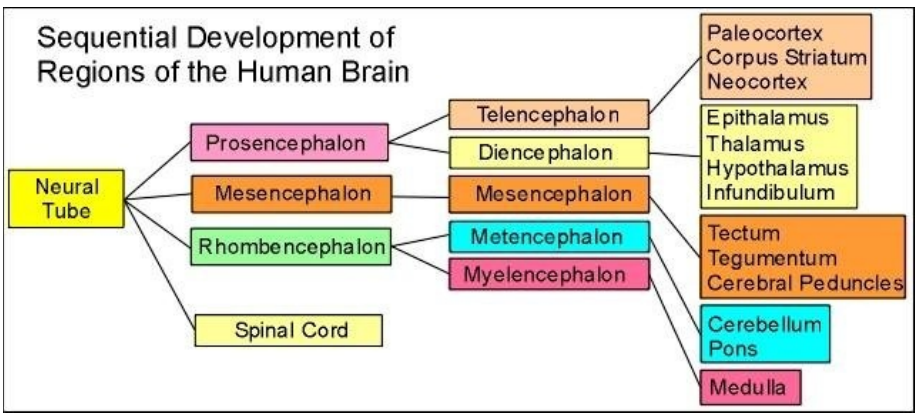
A velőcső lefűződése és a gerinc kialakulása a fejlődő embrióban.Az embrió háti részén a felszínt borító ektoderma (zöld) közepén egy csíkban kialakul a velőcső (lila, első ábra), mely bekerül az embrió belsejébe (2, 3 ábra) és megindítja a gerinc és további szervkezdemények kialakulását (rózsaszínek)

Azt, hogy ez egy program, nem pedig tervrajz szerint történik, az embriológusok ravasz kísérletekkel fedezték fel. Ha a korai velőcső részeit kivágjuk, megcseréljük, esetleg egy másik állatkából vett darab segítségével megkettőzzük, akkor is kifejlődik az idegrendszer, de furcsa szörnyecskéket kapunk. Ezek egy része életképes lehet, csak több lába nő például. Nem ismételném a sejtek kialakulásának és fejlődésének lépéseit, ezek ugye az egyes agyterületeket alakítják ki. Itt a többi folyamatról, elsősorban az agyterületek közötti kapcsolatok kialakulásáról beszélnék.



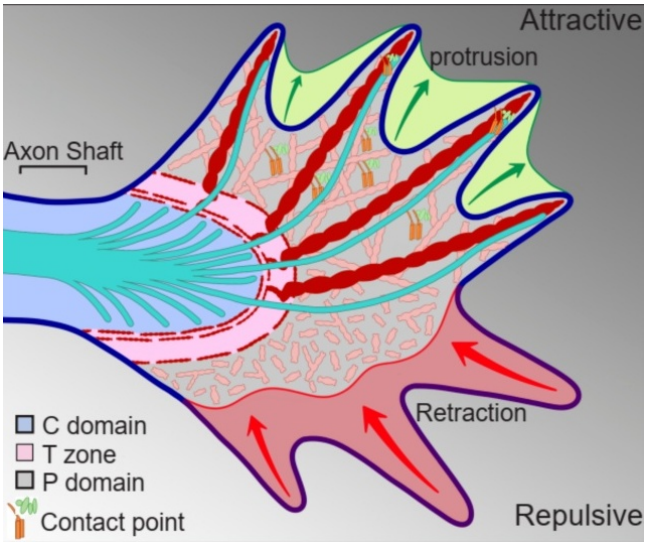
Az idegrendszer fejlődés főbb folyamatainak időzítése. Neurogenezis: idegsejt keletkezés, Neuronal migration: a sejtek vándorlása, Apoptózis: programozott sejthalál, Synaptogenesis: a szinaptikus kapcsolatok kialakulása. Az ábrán külön nem szerepel, de az agyterületek közötti kapcsolatok a az idegsejtvándorlás (migration) periódusa és a korai szinapszis kialakulás ideján történik, emberben a harmadik trimesterben és közvetlen születés után.

A neurogenezis (az idegsejtek kialakulása) és a migráció (amikor az idegsejtek arra a helyre vándorolnak, ahol majd kapcsolatrendszereiket kialakítják) a terhesség hatodik hónapjáig lezajlik. Kialakulnak a jellemző agyterületek és bennük az idegsejtek.



Az agyterületek kialakulásának lépései.

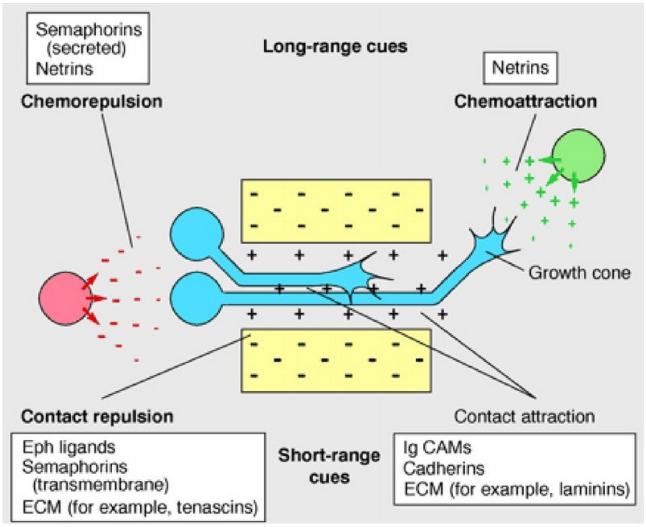
De ekkor még nemigen van az idegsejteknek nyúlványrendszere, azaz az agyterületek nincsenek összekötve egymással. Ez a harmadik, talán a legbonyolultabb mechanizmusú fejlődési fázis, hiszen, ha mondjuk van N agyterületünk az a kombinatorika alapján N alatt a 2 módon kapcsolódhat össze. Ez 10 terület esetében 45 lehetséges kapcsolatfajta, 100 terület esetében 4950. Hasraütve, azt mondanám agyunkban számolhatunk 2-3000 összekötendő területtel, ez kitesz 4.5 millió lehetséges kapcsolatot. Azt, hogy egy idegsejt megtalálja a neki kijelölt célterületen a megfelelő sejtet és dendritjén szinapszisokat alkosson, számtalan sejt és terület specifikusan kifejeződő molekula segíti. A növekvő axonok végén egy növekedési kúp található, mely amőbaként kúszik előre és az amőba őstől örökölt, csak jelentősen továbbfejlesztett molekuláris mechanizmusokat használja ahhoz, hogy kitapogassa a fejlődő agy nyúlványerdőjében merre kanyarodjon.



Az axon növekedési kúpjának szerkezete. Amőbaszerűen tapogat előre. A felszínen elhelyezkedő receptormolekulák tapogatják le a környezetet és határozzák meg melyik irányba terjedjenek ki és honnan húzódjanak vissza a lábacskák.

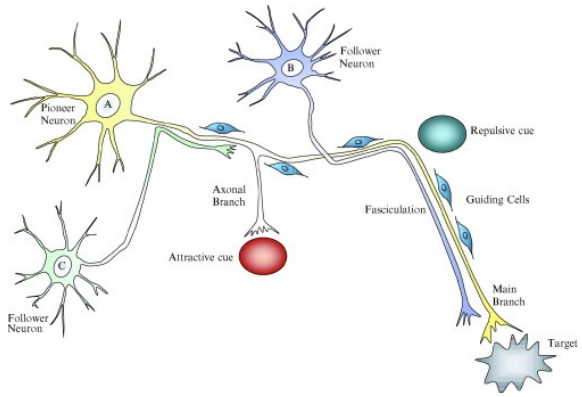
Az útválasztásban 4 féle molekuláris kölcsönhatás segíti. Az egyes kölcsönhatásokban népes fehérjecsaládok vesznek részt. Az emberi genom elemzése során kiderült, hogy ezeknek, az agyi sejtkapcsolódásokat szabályozó molekuláknak a fajtái és száma nőtt meg jelentősen mondjuk az egérhez képest.

Vannak olyan molekulák melyek bizonyos agyterületeken szabadulnak fel, diffundálnak a környezetbe, és taszítják (chemorepulson, piros) vagy vonzzák (chemoattraction, zöld) a növekvő axonokat. Más molekulák az idegrendszer sejtjeinek (gliasejtek, neuronok) felszínén kötve maradnak, vagy a sejt közötti állományba választódnak ki és szintén vonzhatják (+, contact attraction) vagy taszíthatják (-, contact repulsion) a nyúlványokat. A fenti molekulák mellett az axonok növekedésének irányításában még bizonyos gliasejtek is



Az axonnövekedést irányító különböző típusú moekulák. A magyarázatot lásd a szövegben.

segítenek, csatornákat bélelnek körül, amiben az axonok előre tapogathatnak. És persze vannak olyan molekuláris jelek, amiket a célterületen található idegsejtek fejeznek ki, ráadásul nyúlványrendszerük megfelelő részein, mivel nem mindegy, hogy az érkező axonok pontosan hova építik ki a szinapszisokat. Hogy ne kelljen minden idegsejtnek a sötétben tapogatódznia, ezért az evolúció kifejlesztette az úttörő idegsejteket. Először az egyik területről ezek találnak el a másikra, amikor odaértek jelzik a többieknek, hogy most már csak engem kell követni, gyertek. Ezek az idegsejtek aztán gyakran el is pusztulnak és a felnőtt agyban már nincsenek jelen. Ugyanis ők a célterületen már nem feltétlenül végződnek a megfelelő célelemeken, csak odavezetik a később érő sejteket.

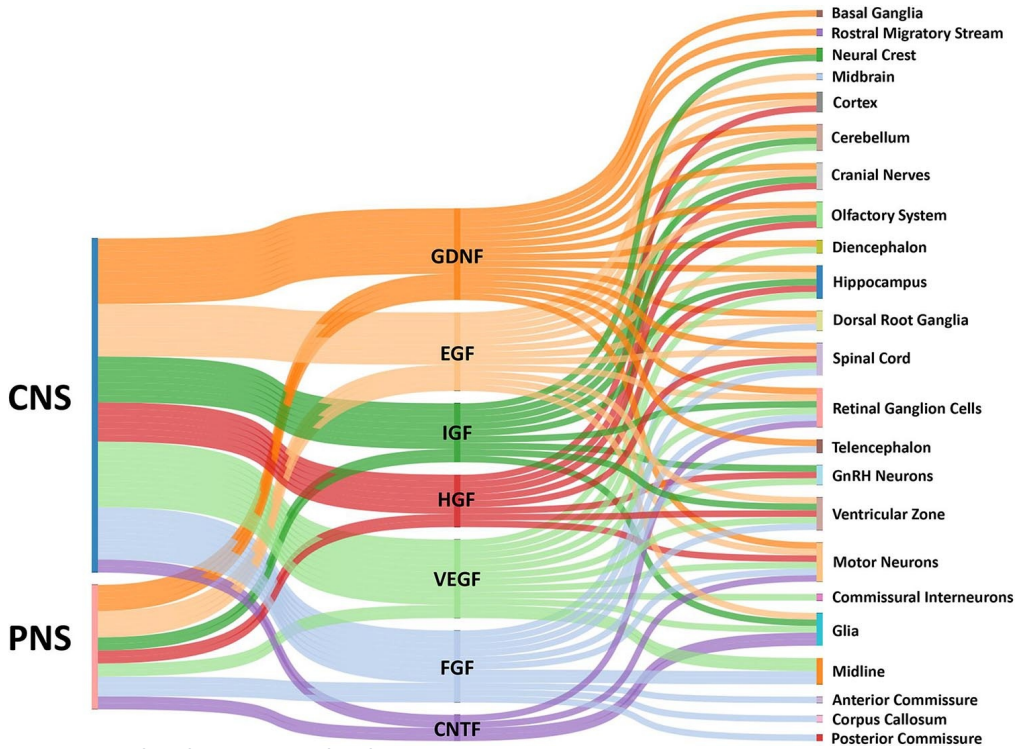


Az axonok növekedését irányító elemek, a jelmolekulák mellett gliasejtek és úttörő idegsejtek is részt vesznek a folyamatban.

Valahogy úgy kell elképzelni az axonok növekedését, mintha különböző módon burkolt utakon (contact jelek), csak különböző járművek haladhatnának, távoli az égre vetített jelek (távoli jelek) alapján. A Pécsre tartó biciklista más útvonalon halad, mint aki autóval vagy vonaton utazik. Pontos haladásukat még útszéli oszlopok és útjelzőtáblák is segítik, mint a gliasejtek a fejlődő idegrendszerben. A célterületek megtalálásának programjában van még egy fontos elem, az idő. Az agy gyakran alkalmazza azt a trükköt, hogy ha az axonok eltaláltak egy területre ott hozzákapcsolódnak a célsejtekhez és a később beérkező axonoknak már nincs hely, ilyenkor tovább mennek, és ahol találnak szabad kötődési helyeket ott csinálnak kapcsolatokat. Ez például az agykéreg zsinórózásánál fontos. Az először kialakuló sejteken végződnek a legkorábban megérkező axonok, melyek a korábban kialakult, evolúciósan ősibb területekről érkeznek. A később kialakuló sejtek, később kialakuló, az evolúció során később megjelenő területekről kapnak bemeneteket.

Például, az egészséges fejlődés során, a megfelelő kémiai és anatómiai jeleket követő, axonok a látó thalamuszból elkezdenek benőni az agykéreg látó részére. Amikor megtalálják a látókérget, ott kapcsolatokat kezdenek alkotni. Ha valamilyen fejlődési rendellenesség miatt vagy egy kísérleti beavatkozás hatására nem alakul ki a szem, akkor a szemből nem érkeznek rostok a látókéregbe, annak sejtjei viszont készek szinapszisok fogadására. Ilyen állatokban azt figyelték meg, hogy az agykéregbe a halló talamusz felől benövő axonok, mielőtt elérnék a hallókérget, a látókéregben is kapcsolatokat alakítanak ki és megindítják annak érését. Ezáltal a látókéreg kapacitása is részt vehet a hallásfeldolgozásban. Ez megmagyarázhatja bizonyos vak emberek kifinomult hallását. Illetve bemutatja, hogy a program szerinti építkezés jobb, mint a tervrajz szerinti építkezés.

Egy kicsit finomítva mi is történik? Amikor egy agyi területen kialakulnak az idegsejtek, akkor a területnek megfelelő géneket kapcsolnak be. Egyrészt elkezdenek termelni olyan molekulákat, amelyek felszabadulnak és vonzanak vagy taszítanak bizonyos axonokat (távoli jelek), másrészt a felszínüket feldíszítik olyan molekulákkal, melyek vonzhatnak vagy taszíthatnak (közeli jelek) máshonnan érkező axonokat. Ezzel egyidőben olyan receptor molekulákat kezdenek beépíteni axonjaik növekedési kúpjába, amelyek segítségével azok megtalálják merre kell menniük, és a célterületen milyen sejteken kell végződniük. Olyan ez, mint amikor az ételfutárok megkapják, hogy melyik étteremből, hova kell elszállítani a kaját. Mindenkinek van egy célja (receptor molekula követi) amit meg kell találnia. Mint az alanti ábra mutatja nem kell minden területnek egyedi molekulákat kifejeznie. A gyakorlati megoldás az, hogy a különböző agyi területek eltérő célzómolekula kombinációkat fejeznek ki és az axonok megtalálják az ízlésüknek megfelelő célmolekula kombinációt kifejező területeket.



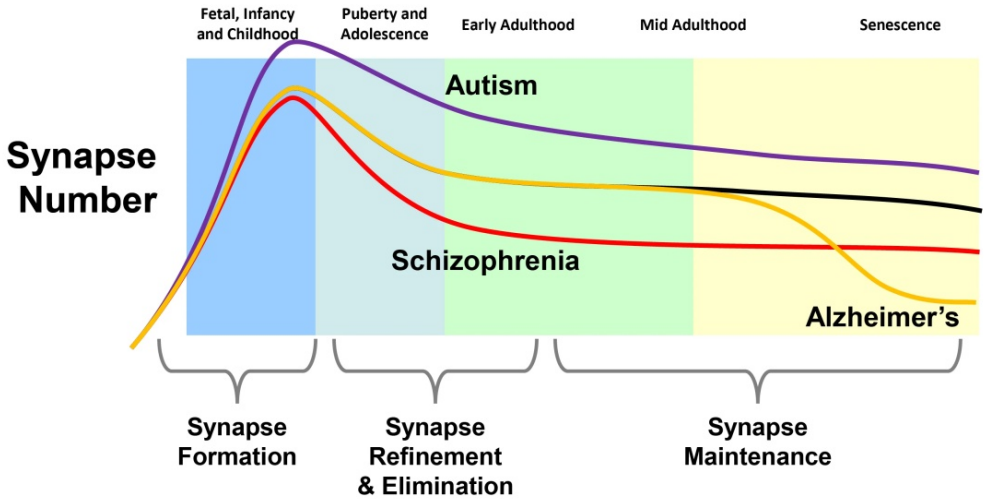
A központi (CNS) és környéki (PNS) idegrendszer összeköttetésrendszereinek irányításában részt vevő növekedési faktorok (középen). Jobboldalt az látható, hogy az egyes célterületek milyen növeedési faktor kombinációval segítik az axonok odatalálását.).

Folyt köv.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agyfejlődés programja II.: túltermelés és térképek az agyban

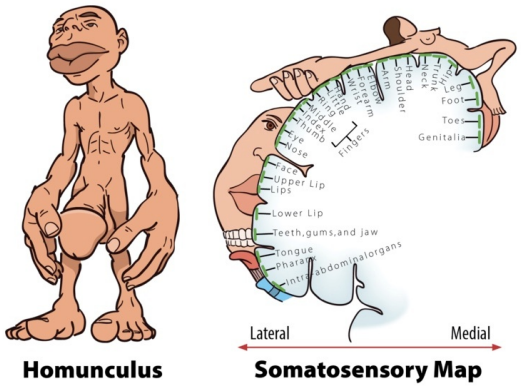
Mielőtt továbblépünk a szinaptikus kapcsolatrendszerek kialakulásának programjára, egy fontos folyamatot meg kell még említeni, mert szükség lesz rá a továbbiakban. Az alanti ábra a szinapszisok számát mutatja a fejlődő agyban. Az ábrán nincs rajta, de az idegsejtek száma is hasonlóan változik (bár korábban kezd nőni mint a szinapszisszám). Az embrionális fejlődés során az idegsejtek, majd ezt követve a szinapszisok száma is meredeken növekszik. Születés előtt a legmagasabb, majd a kamasz korig először gyorsan majd lassabban csökken. Kamasz kor után az idegsejtek száma egészséges esetben nem változik, de a szinapszisok száma lassan csökken. Az ábra azt is mutatja, hogy az autizmusban és a skizofréniában a számok változása jellegzetesen eltér, illetve, hogy Alzheimer kórban erősen csökkenni kezd a szinapszisszám (zöld egészséges, sárga Alzheimeres eset). Tehát először számfeletti idegsejtünk és szinapszisunk alakul ki, hogy a fejlődési programnak legyen miből vágnia. Ezt a sejtpusztulási időszakot az előző bejegyzés második ábráján az Apoptózis (programozott sejthalál) periódusa jelzi.



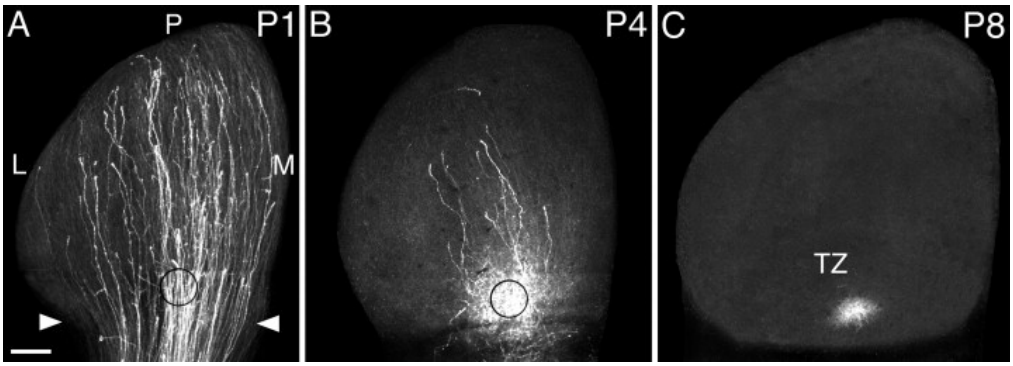
A szinapszisok számának változása az élet során az emberi agyban. Születés előtt tetézik az idegsejtek és szinapszisok száma.

A programozott sejthalál periódusával majdnem le is zárul az agyi területek és kapcsolatrendszereik kialakulása, melyet a másik program bekapcsolása követ, melynek során a szinaptikus kapcsolások finomhangolása történik meg a felnövekvő egyedben, tanulás útján, melyet a Hebb-szabály segít.

Mielőtt erre lépünk, még be kell mutassak egy átmeneti mechanizmust. Ez pedig a terjedő idegsejt aktivitás hullámok. A látó, halló és tapintó rendszerben megfigyelhető, hogy a látószerv (recehártya), a halló szerv (Corti-szerv, hallócsiga) és a testfelszín meghatározott, jól rendezett, térképszerű módon vetül a thalamusba és onnan tovább a megfelelő agykérgekbe. A retina két pontja az elsődleges látókéreg két szomszédos pontjára vetül, egyféle letérképezés történik. Ugyanígy két közeli hangmagasság a hallókéreg két közeli területét ingerli. És hát az iskolában be szokták mutatni a homonkuluszt, a nagy nyelvű, nagy ajkú, nagy kezű, kicsi emberkét, mely testfelszínünk vetületét mutatta be az érző agykéregben. Azt láttuk, hogy mondjuk a látó thalamuszból hogyan találnak el az axonok a látókéregbe. De hogyan alakulnak ki a megfigyelt térkép szerű vetítések? A megfejtést a látórendszer vizsgálata adta. Amikor az axonok elérik a thalamuszban és a látókéregben a célsejteket, akkor a retina véletlenszerű pontjaiból aktivitás hullámok indulnak ki. Mi ennek hatása?



Balra a testtájak agyi reprezentáció szerint megnagyobbított képe a homunkulus 3D modelljén. Jobb oldalt az érző agykéreg felszínére vetített homonkulus, mutatja, hogy az agy felszínén megjelenik a test térképe.



Látoinformációt hordozó axonok fejlődése az agyban. Magyarázat a szövegben

A felső ábrán az egér retinájának egy pontjából eredő axonjainak elágazásrendszere látható az agyban. Az 1 napos egérben az axonok még összevissza futnak mindenfelé. A negyedik napra már körülhatároltabb területen, a nyolcadik napon, pedig pontszerűen végződnek. Amikor a retina egy pontja a megszületett, de még vak kisegérben működésbe lép, akkor erről a pontról, az axonok mentén beterjed a jel az agyba. Amikor az aktivitás a hullámmal kicsit odébb mozdul a beterjedő aktivitás, újabb axonok aktiválódnak az agyban. De csak azok az axonágak fognak megmaradni, amelyek aktiválódása az agyban is egymáshoz közel történt. Néhány nap és több ezer aktivációs hullám után, az axonvégződések úgy rendeződnek át az agyban, hogy a retina közeli pontjairól az agy közeli pontjaira futó axonok maradnak csak meg. Amikor érzéstelenítővel gátolták ezeket a hullámokat a retinában, a kisegérben az axonok olyanok maradtak, mint az A ábrarészen, nem tudott kialakulni a térkép szerű vetítés és az állat nem tanult meg látni.
Ezt a folyamatot azért szúrtam be az agy anatómiai fejlődése és a szinaptikus kapcsolatokat finomító tanulás közé, mert egyrészt részt vesz a kapcsolatrendszer kialakításában, másrészt már a tanulás alapjául szolgáló Hebb-szabályt használja. Azt is bemutatja, hogy az agy a fejlődés során véletlenszerűen sokkal több axont (és idegsejtet) növeszt, mint amire később szükség van. Ugyanis a későbbiekben már nem keletkeznek új idegsejtek (és alapvető pályák, kivéve a kamasz kor agyi átzsinórozódását) és ezért az átalakítás csak ritkítás után oldható meg.
Folyt köv.

Szerző: **Gulyás Attila**

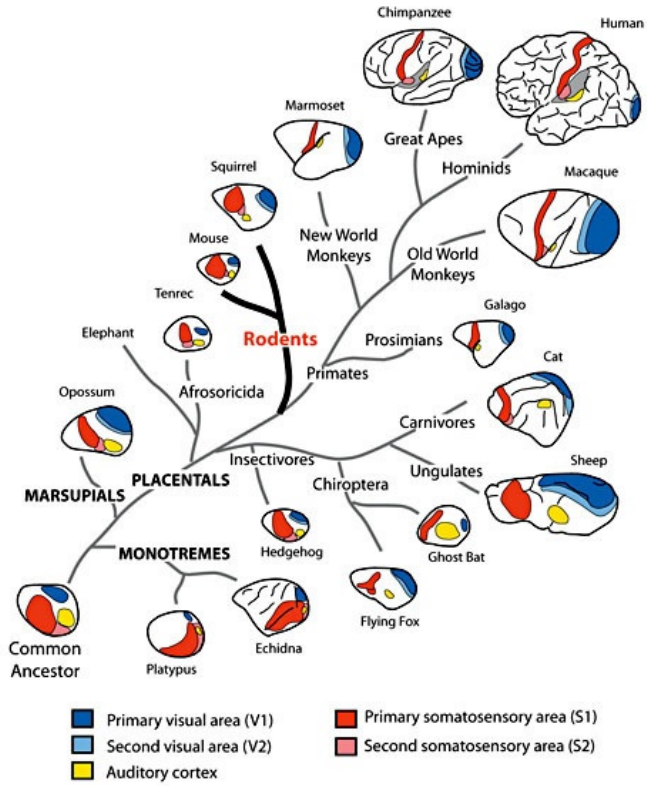
Az agyfejlődés programja III: a második program, a tanulás

És akkor ismételjük át a második agyfejlődési programot a tanulást, hiszen korábban bőven beszéltünk róla.
A tanulás szabálya (Hebb- szabály) azt állítja, hogy ha két idegrendszeri elem egyidejűleg aktív, akkor közöttük a kapcsolat erősödik. Praktikusan, ha egy axon kisül és közben (időben közel) a cél idegsejt is kisül, mert a rá érkező ingerek kellően erősek voltak (azaz részt vesz a reprezentációban), akkor közöttük szinapszis alakul ki, vagy ha már volt megerősödik. És ami fontos, ahol nem alakul ki kapcsolat, ott a korai fejlődés során elhalnak az axonok, sőt azok az idegsejtek is elpusztulnak, amelyeknek nem sikerült elegendő működő bemenetet begyűjteniük, azaz nem vesznek részt reprezentációban.

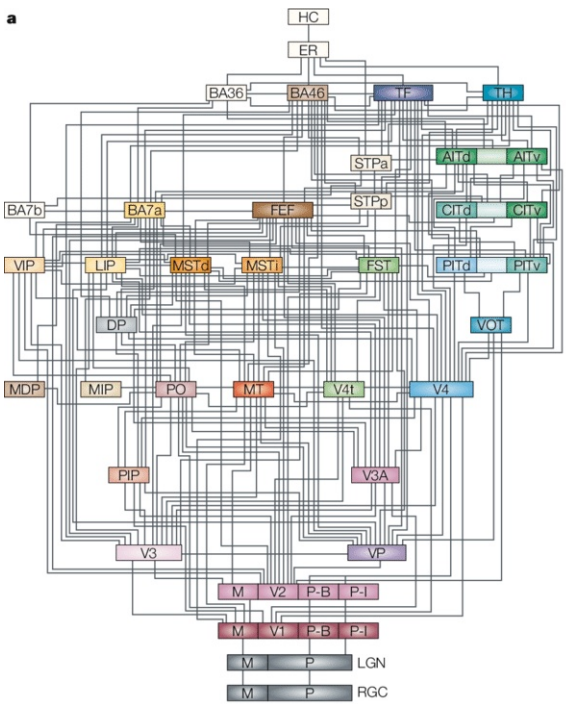
Az idegsejtfejlődés (neurogenezis) és pályafelépülés során azért keletkezik számfeletti sejt és axonág, mert a feleslegből egyszerűbb nyesegetni a tanulás során, mint az axonoknak hosszasan keresgélni (ilyen is van persze), hogy hova kapcsolódjanak.

Van itt még egy fontos dolog. Erről majd később lesz részletesen szó, de az agy evolúciója

során egyre újabb területek alakultak ki az agyban (elsősorban az agykéregben), melyek egyre összetettebb feladatok megoldására voltak képesek. Ezek a területek bonyolult, többszintű (hierarchikus) hálózatban kapcsolódnak információ feldolgozási láncolatokba, mint ahogy a ChatGTPT esetében az egymás utáni rétegek (persze a ChatGPT tervezői ezt az agyszerkezettől tanulták). A makákó majom látórendszere esetében például harmincvalahány agyterület kapcsolódik többszintű hálózatba.
Ugye az egyedfejlődés leköveti a törzsfejlődést. Azaz, az agykérgi területek kialakulása az embrióban hasonló sorrendben történik, mint ahogy azok törzsfejlődés során megjelentek (csak ugye nagyságrendekkel gyorsabban). A feldolgozási lánc elején álló agyterületek korábban alakulnak ki és korábban kezdenek el



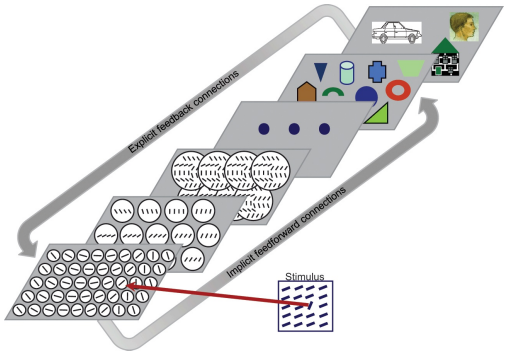
Az emlős agykéreg evolúciója. Kék és világoskék területek az elsődleges és másodlagos látókérget, a sárga a hallókérget, a piros és a rózsaszín pedig az elsődleges és másodlagos érző kérget jeleni. A törzsfa gyökerénél kévő ősemlősben az agykéreg nagy részét ezek a területek tették ki. A fejlődés során ezek mellett újabb, az ingerek összetetteb feldolgozásához és a tervezéshez hozzájáruló területek jelentek meg.



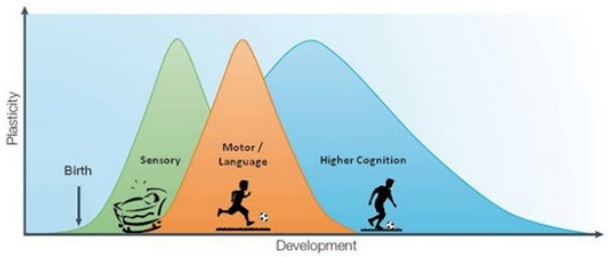
bezsinórozódni, tanulni is. Ennek a fokozatosságnak fontos szerep van az agyi reprezentáció, kódolás kialakításában is.
Először az egyszerűbb feldolgozást végző területeknek kell, hogy kialakuljon a kódja, aztán ha ez megvan kezdhet kialakulni a következő szinté is. Az iskolában is, először megtanuljuk megfogni a ceruzát, aztán egyenes, átlós és görbe vonalakat húzunk, majd betűket, szavakat, mondatokat és a végén fogalmazásokat írunk. A látórendszerben az elsődleges látókéreg vonalak érzékelésével foglalkozik, a magasabb rendű, másodlagos területek sarkokat, szögeket, formákat, tárgyakat azonosítanak. Vannak aztán olyan ún. asszociációs területek, ahol már több eltérő érzékszervből érkező reprezentáció olvad össze például az aktuális szituáció érzékelésére.

A főemlősök és az ember látásfeldolgozásában részt vevő agykérgi területeinek hálózata. Több mint 30 terület kapocslódik egymáshoz és segíti egymás működését előre és vissza irányuló kapcsolatok útján.

Az agyban ennek a hierarchikus, időben eltolt tanulásnak molekuláris lenyomata is van. A Hebb-szabályt molekuláris szinten a serkentő ingerületátvivő anyag a glutamát NMDA receptora valósítja meg. Ennek a receptornak több változata van. Van olyan változat, ami hatékony, gyors szinaptikus tanulást tesz lehetővé és van olyan, ami nem kapcsolja be a tanulási mechanizmusokat. A fejlődés korai szakaszában a feldolgozási lánc korai területein használják a sejtek a gyorsan tanuló változatot, de miután a hálózat megtanulta, amit kellett, a merev formára váltanak és a rugalmas forma a következő szinten jelenik meg. Vannak olyan agyterületek, asszociációs kérgek (a memória tárolásban fontos hippokampusz



A látásfeldolgozás során a magasabb területeken a látvány egyre összetettebb elemei reprezentálódnak. Pontok, csoportok, alakok, tárgyak reprezentációja alakul ki.



A tanulás először az érzékelő területeken indul, innen áttevődik a mozgatóterületekre, végül a döntésben részt vevő asszociációs területeken indul be és marad fent életünk végéig.

és a tudatossághoz, döntésekhez fontos homloklebeny) ahol a tanulásra képes forma életünk végéig megmarad, mert életünk végéig képesnek kell lennünk az összetettebb dolgok tanulására.
Talán mindenki hallott az imprinting-ről, mely folyamatot Konrad Lorenz etológus munkássága tette híressé (bár magát a jelenséget Morus Tamás 1516-ban megjelent utópiájában már leírta). Ugye itt az történik, hogy a tojásból kikelő kiscsirke, kiskacsa életre szólóan követni fogja azt, akit először meglát. Nyilván van a látórendszerében egy nagyon jól időzített tanulási időszak erre, ami akkor működik amikor kikel a tojásból.
Ezek a tanulási összehangolások is programokként futnak, amikor egy terület kialakul elindul a tanulás. Abban kicsit más a program az egyes agyterületeken, hogy a tanulás mikor álljon meg.



Conrad Lorenz és az őt követő ludak

Az agy kapcsolatrendszerét tehát nem a genetikai kód alapján építi fel, hanem a genetikai kód által futtatott programok felhasználják a környezetből származó információt. Ahhoz, hogy az agy hatékonyan tanuljon sok információt kell gyűjtenie. Ezért az evolúció során kialakultak meta-programok is, olyan programok, melyek az agyfejlődés programjait segítik: a kíváncsiság, az utánzás és a játék programjai.

Ezek a programok mind azon a belénk épített mechanizmuson alapulnak, hogy amikor új információt szerzünk meg, akkor az agyunkban dopamin szabadul fel, melyet szerveztünk



Űrhajóst játszó gyerekek. A felnőttek és nagytestvérek utánzásával lehet a leghatákonyabban tanuln. Ha túléljük :)

örömként él meg (lásd a drogokról szóló cikkeket). A kíváncsiság és a belőle fakadó öröm hajtja a kisgyereket (és az élénkebb elméjű felnőtteket) arra, hogy felfedezzenek, kísérletezzenek. Az utánzás ösztöne pedig gyorsítja a tanulást azáltal, hogy nem véletlen szerű felfedezéssel szerzünk információt, hanem megfigyeljük és lekövetjük, amit a felnőttek vagy nagyobb testvéreink csinálnak. Nem csoda, hogy minden kisgyerek manapság az okostelefont akarja nyomogatni, ugyanis azt látja, hogy minden felnőtt azt nyomogatja. így sajnos lassan nem lesz idejük a játékra, ami pedig mindkét dolgot, a felfedezést és az utánzást is egyesíti a gyakorlással.

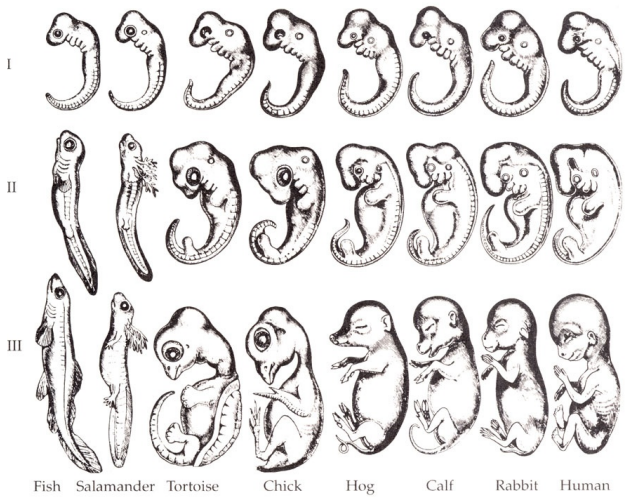
Szerző: **Gulyás Attila**

A hálózattervezés csúcsa: Az agykéreg I.

Az alapozásnál megbeszéltük, hogy agyunk két szerveződési alapelveiben és funkciójában eltérő részre oszlik. Az ősi, életfontosságú funkciókban meghatározó, merev, egyedi szerkezetű kéreg alatti területekre (nyúltagy, középagy, és az előagy bizonyos részei), valamint a modern, emlősökben hatalmasra nőtt, moduláris, általános feladatok megoldására és tanulásra képes rugalmas agykéregre.
A továbbhaladáshoz szükséges, hogy elmerüljünk az agykéreg szerkezetének felépítésében, mert ez később szükséges lesz az agyműködés finomságainak és a tudatosság kialakulásának megértéséhez.

Az agykéreg eredete, evolúciója

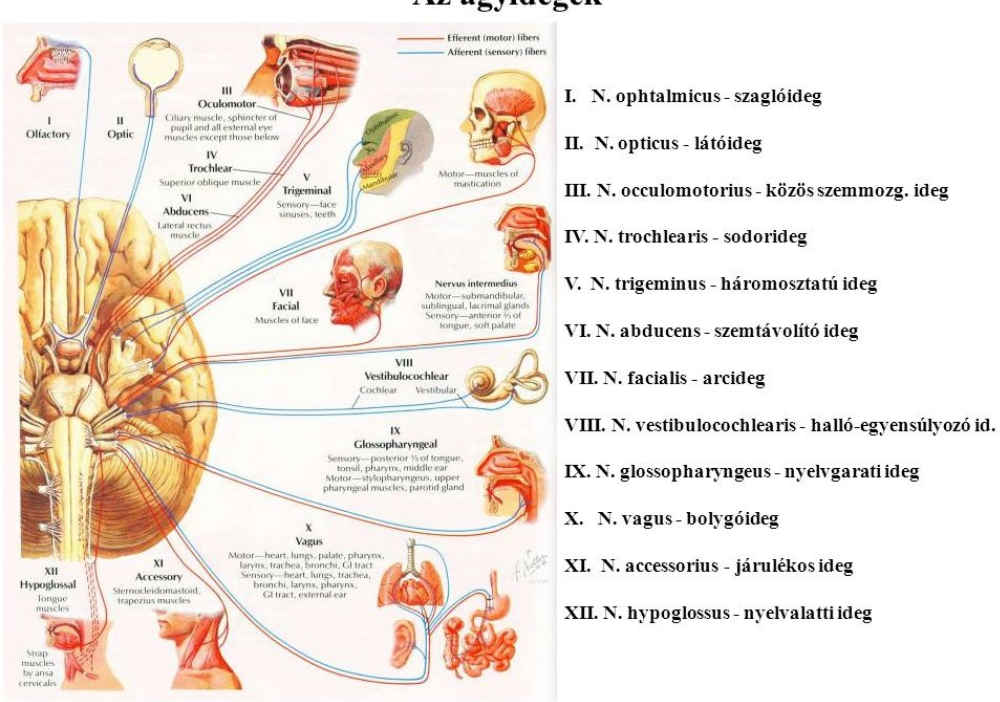
Mint azt Ernst Haeckel (nem teljesen helyesen) mondta: „Az ontogenezis (egyedfejlődés) megismétli a filogenezist (fajfejlődést)". Azaz egy embrió fejlődése leköveti ősei testének fejlődését az évmilliók során (többé kevésbé). Ez persze nem csoda, mert az egyre bonyolultabb struktúrák a törzsfejlődés során egyre bonyolódó génhálózati kölcsönhatások eredményeként alakulnak ki. A fejlődő embriókban pedig a genetikai program az elejéről fut le. Nehéz lenne elképzelni egy szem kialakulását amikor még gerinc és agy sincs. Az agykéreg viselt dolgainak megértéséhez hasznos, ha részletesebben beszélünk az agykéreg kialakulásáról, mind az evolúció, mind az embrionális fejlődés során.



Haeckel ábráj a különböző fejlettségű gerincesek

embriófejlődésének hasonlóságából. A magasabb rendű gerincesek embrióinak fejődése köbeti a korábbi lépcsőfokokat

Korábban volt szó arról, hogy az embrió meghatározó alkotóeleme a velőcső, és hogy ennek a feji végén kialakul három agyhólyag, amiből az elő, közép és utóagy keletkezik. A velőcső és az agyhólyagok fala megvastagszik, belőlük alakul a gerincvelő és a feji részen az agy részei, míg az üregből a gerinccsatorna és az agykamrák alakulnak ki, melyekben a cerebro-spinális folyadék, a liquor vagy magyarul az agyvíz kering. Ez szokott felforrni 😊. Olyan, mint a kürtőskalács, amikor sül megvastagszik, és a lényeg a falában van, nem a lukban a közepén.
Mivel a három agyhólyag mindegyikéhez agyidegek tartoznak, melyek a feji (és mellkasi) szervek felől szállítanak információt és a feji (és mellkasi) izmokat-mirigyeket idegzik be, ezért az egyszerű gerincesekben a három agyrész felelős az egyes modalitások (szaglás, látás, egyensúlyérzés-hallás, testérzet) alapvető feldolgozásáért.



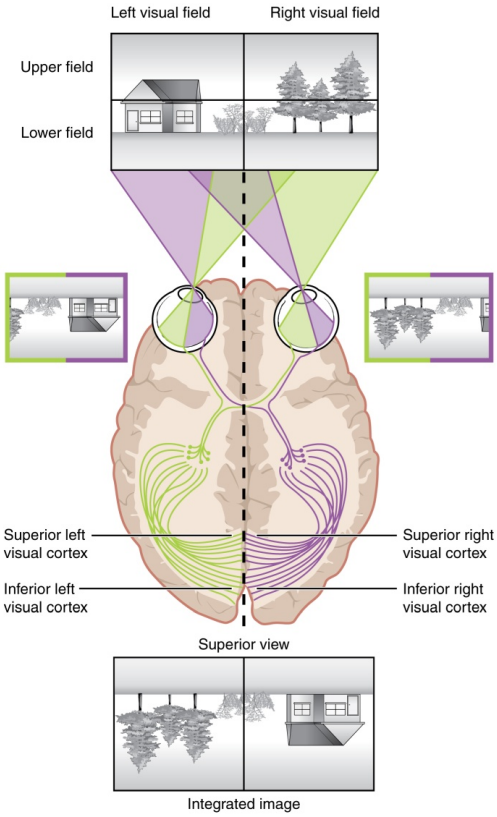
Az egyes agyidekhez tartozó érzékszervek és izmok. Az egyes érzékek feldolgozásával az agynak más területei foglalkoznak. A szaglás az első agyidegen a legelső agyhólyagba lép be.

Az utóagy a hallás-egyensúlyérzés, a középagy a látás, az előagy pedig szaglás elsődleges feldolgozó területe az ősi gerincesekben.
Az egyensúlyérzés azért kötődik össze a hallással, mert a takarékos evolúció a halak testét és fejét behálózó, a vízáramlást, illetve elektromos jeleket érzékelő oldalvonal szervéből fejlesztette a gerincesek egyensúlyérző félkörös ívjáratait és a velük egy csőrendszert alkotó hallócsigát. Egy ideg szolgálja ki és köti az agyhoz.

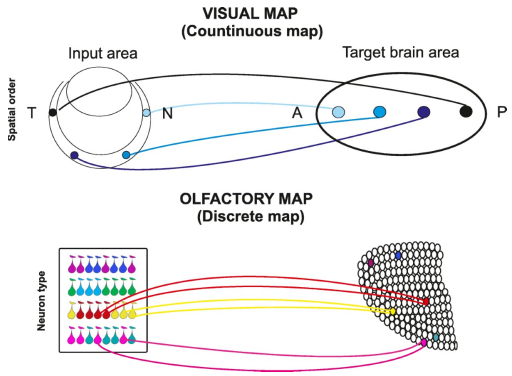
Egy ponton, valahol a kétéltűek környékén aztán történt valami. A szaglást feldolgozó előagyban megjelentek olyan területek, amelyek elkezdtek foglalkozni a hallás, testérzés, látás ingerek összetettebb feldolgozásával. Az emlősökben az eredeti helyeken most már csak előfeldolgozás történik meg, mely megfelel az ősi funkcióknak. Ilyen például a hallás és

látás orientációs reflex, melyek kialakításában a colliculus inferior és superior nevű agyterületek felelősek. Ezek a területek a kép és a hang alapján azonosítják, hogy a tér mely pontjáról indult ki a jel, ennek pozícióját sejtaktivitásuk kódolja, majd az állatot abba az irányba fordítják, ahonnan az inger érkezett. A béka ezzel a reflexszel fordul a légyre, majd kapja el kilőtt nyelvével. A látás, hallás és tapintás bonyolultabb feldolgozása, mit látunk, hol látunk, merre mozog stb. már az egyre sokasodó agykérgi területeken történik meg.

Érdekes módon azon a kérdésen, hogy miért pont az előagy vált az agy legabsztraktabb funkcióit elvégző területévé, tudomásom szerint nem sokan elmélkedtek, pedig szerintem egy fontos kérdés. Én azt gondolom (FIGYELEM ez most egy találgatásos rész!), hogy ennek két oka van. Elsőként: az állatok legfontosabb érzékszerve a szaglás. A fejlett szemek és fülek kialakulása előtt, és még sok állatban azóta is, a szagok nyújtják a legtöbb információt a külvilágról. Mi főemlősök és a ragadozók egy része (macskafélék, menyétfélék) kivételnek számítunk azzal, hogy erősen a látásunkra támaszkodunk.
Amikor távoli ősünk felderítette a környezetét, mindent az elsődleges ingerhez, a szagláshoz kötött. Azaz a bonyolódó agyban megérte, ha a nem-szag információk is eljutottak az előagyba, hogy integrálódjanak. Kevés kép vagy hang tud olyan mély, zsigerből feltörő élményt kiváltani agyunkban, mint egy-egy illat, szag, aroma. Lásd a lecsó illatának hatását Anton Egora, a Lecsó című rajfilmben. Az étel illata visszarepítette gyerekkorába és édesanyja főztjéhez. Ami nem csoda, mert az érzelmeinkért és emlékeinkért felelős limbikus rendszer a szaglóagy köré épült!
De ugye ettől még fordítva is lehetett volna, hogy a szaglás jut el máshova. A második sejtésem megokolhatja ezt a választást. A szaglás teljesen máshogy reprezentálódik - kódolódik mint a hallás, látás, tapintás.
A hallás, látás, tapintás információk olyan érzékszervekből érkeznek, amelyek felszínén egy 2D (vagy a hallás esetén 1D) felszínre rendezve helyezkednek el az érzéksejtek. A retina két pontja, a test felszínének két pontja vagy a hallócsiga két szomszédos frekvenciája egymáshoz közeli dolgokat jelent. Ezek a pontszomszédságok aztán tovább vetülnek a feldolgozási területre. A feldolgozó idegsejtek kapcsolatrendszere erősen megszabott, merev, a szomszédság nagyon fontos, nincsenek szabad, messzire futó véletlen kapcsolatok. Azt mondjuk a vetítések topografikusak (térkép-szerűek). Ha valaki járatos az AI hálózataiban azt mondhatjuk, hogy ezek konvolutív hálók. Az ilyen hálók nagyon érzékenyek térbeli szomszédságok, elmozdulások, élek, frekvencia arányok érzékelésére, a hely meghatározására, ami fontos ezekben a modalitásokban. Ezzel szemben a szaglás egy káosz. 10-20 millió szaglósejtünk a rendelkezésre álló 500-750 szaglóreceptort egyedi kombinációkban használja. A sejtek közötti kapcsolatok kuszák, távoliak, látszólag véletlenek. Míg pl. a látórendszerben a feldolgozás alacsony szintjén két hasonló képet, hasonló sejtmintázatok kódolnak a szaglórendszerben az egyes szagokat teljesen eltérő mintázatok. Ugye a szagokat nem lehet valamilyen kevés (1-2-3) dimenziós térben egymás mellé rendezni, és ezért



A szemünkbe érkező kép retinánkra vetül, majd innen tovább elsődleges látókérgünkre. A látásfeldolgozás kezdet lépéseiben a térbeli szomszédságok megmaradnak. A kódolás meglehetősen meghatározott.

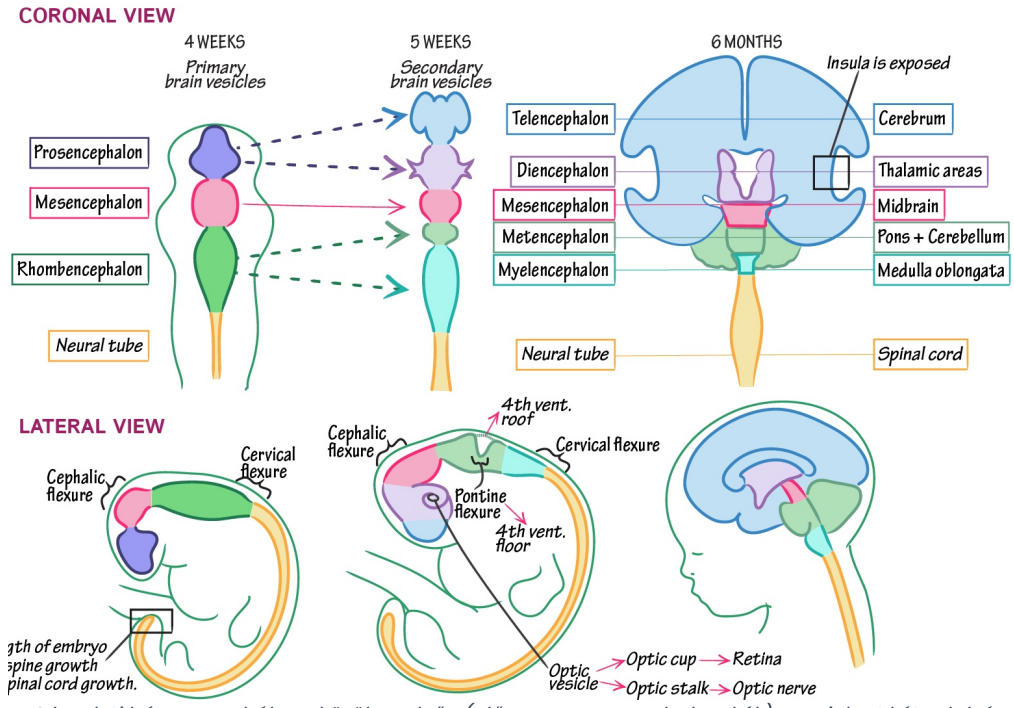


Míg a látópálya vetítésében megjelenik valami folyamatosság, térbeli rend (felül), a szaglósejtektől érkező ingerek a szaglókéregben egyedi mintázatokat váltanak ki, melyek nem rendezhetők egymás mellé és a szaglókéregben egyedi sejtmintázatokat aktiválnak (lent).

rendezetten reprezentálni sem. Szagokat nem nagyon tudunk hasonlításokkal leírni. Mire hasonlít a gyöngyvirág illata? Amikor a látás, hallás, tapintás feldolgozás komplexitásában megjelent az igény, hogy ne csak azt érzékeljük hol az inger, hanem azt is, hogy az micsoda, a hardware nem volt alkalmas ennek elvégzésére. Azt, hogy almát, körtét, baltát, ragadozót vagy mumust látunk, nem térképezhető le egy 2D feldolgozásra szakosodott hálózatban. Itt volt viszont a szaglórendszer a maga szabad asszociációival és a többi modalitás elkezdett tőle kölcsönkérni területeket (lásd a gén, funkció és szerv-kettőződéses történetét). Nem beszélve arról, hogy mint az első érvnél írtam, a szagláshoz társítódott minden. Spekuláció zárójele bezárva!

Folytatjuk tényekkel.

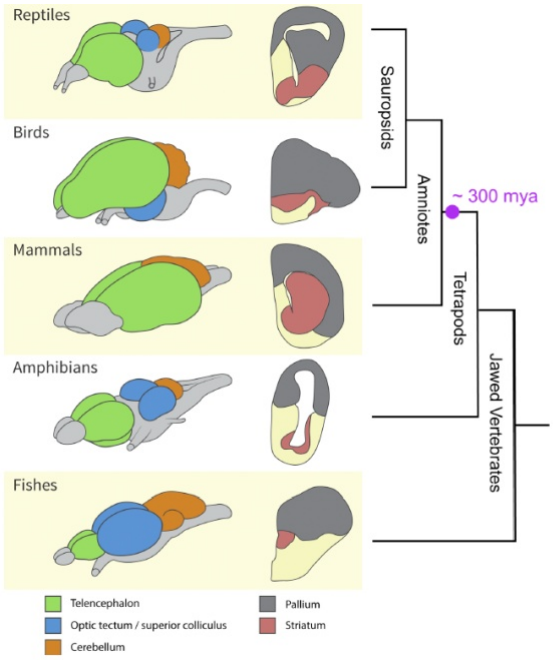
Ahogy nőtt az előagy szerepe, területe is növekedni kezdett. Az első agyhólyag két oldalán két kitüremkedés jelent meg, két újabb hólyagocska és az agykéreg ezek falaiból kezdett kifejlődni, üregeikből pedig a bal és a jobb agykamra.



A kezdeti három agyhólyag közül az elsőn (előagy, prosencephalon, kék) megjelent két odalsó agyhólyag, melyekből fejlődtek az agyféltekék, melyek felszínét az agykéreg borítja, tövüknél pedig kialakult a köztiagy (diencephalon, lilás).

Az első azonosíthatóan agykéreg kinézetű dolog a hüllők egy részében, gyíkokban jelenik meg. De az eredetéül szolgáló pallium nevezetű agyterületeket már primitív halakban (körszájúak) meg lehet találni. Számos molekuláris bélyege megegyeznek a későbbi agykérgével. A palliumból a therapoda dinoszauruszok és mai leszármazottaik a madarak agyában egy másik fejlődési úton az emlős agykéreghez hasonló megoldásokat alkalmazó előagyi területek fejlődtek.

Az első kéregterületek kialakulásakor az oldalsó agyhólyagok még kicsik voltak, a hólyagok falából pedig csak egy 1 sejtrétegből + 3 dendritikus rétegből álló egyszerű agykéreg az archicortex alakult ki. Ez a szerveződés még most is megfigyelhető az agykéreg egyik fontos központi területén, a memória kialakulásában fontos szerepet játszó hippokampuszban. Én ezt az agyterületet és a benne található idegsejteket vizsgáltam 35 éven keresztül, mivel egy egyszerűsített változatát mutatja a később kialakult összetetteb 6 rétegű neocortexnek, azaz új-agykéregnek. A később kialakult agykérgi területek a kitüremkedő hólyag középső területére épültek be, így az archicortex, majd az utána kialakuló kicsit összetettebb paleocortex (ami már 2-3 sejtréteggel rendelkezik) az első agyhólyagról leágazó hólyagocskák nyelére, szegélyére (latinul limbus) szorultak. Az agy ezen részeinek rendszere, elhelyezkedése alapján, a limbikus rendszer nevet kapta, és alapvető szerepe van az érzelmek és memóriák kialakításában. Az evolúció során egyre növekvő neocortex tömege a limbikus rendszerhez, sőt az egész agyhoz képest is egyre nagyobb lett és kialakította a két hatalmas agyféltekét. Az agykéreg fejlődésével egyidőben számos előagyi struktúra is kialakult és létrehozta a köztiagyat, mely az előagyhólyag felső részéből fejlődött. Ezek a területek fontos átkapcsoló állomások a középagy és az agykéreg között, mindkét irányban. Ide tartozik többek között a thalamusz és a striátum.



A pallium fejlődése az evolúciós során. Bal oszlopban az agyak 3D nézete, jobb oszlopban keresztmetszet az előagyon keresztül. Zöld az előagyat, előtte a szörke a szaglógumót jelzi. A jobb oszlopban a szürke területek mutatják a palliális struktúrákat, amik az emlősökben az agyérget alkotják.

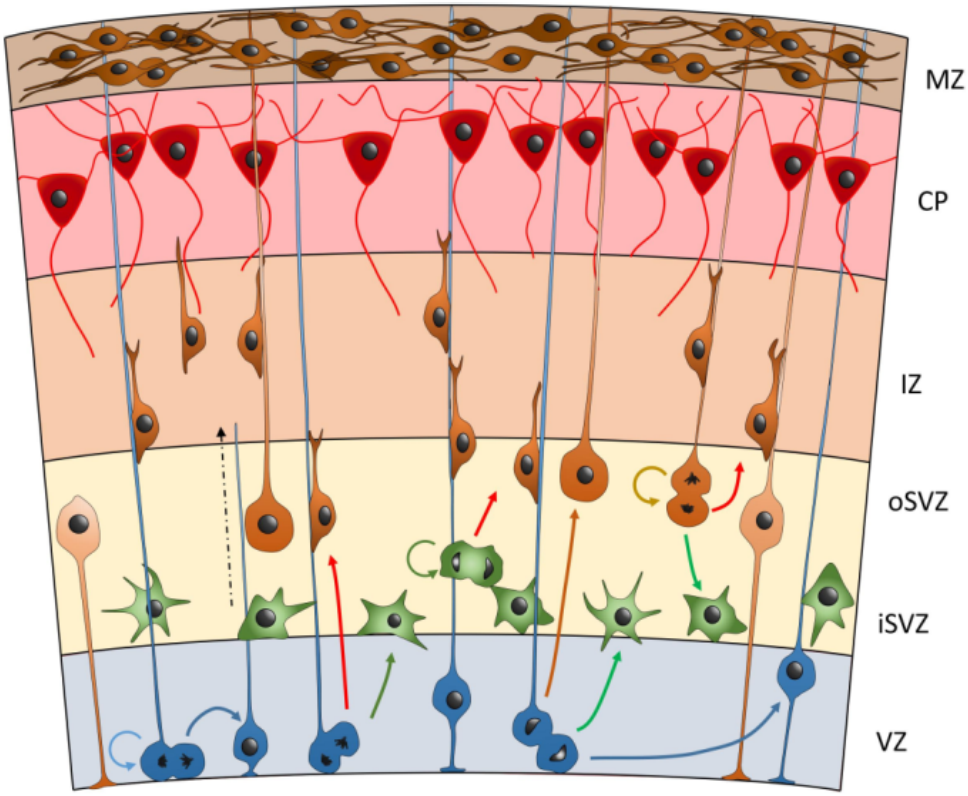
De hogyan is lesz az agyhólyagból agykéreg? A gliasejtek bejegyzésben érintettük ezt a kérdést. A következő bejegyzésben ezt újra elmesélem, egy kicsit máshogy.

Szerző: **Gulyás Attila**

A hálózattervezés csúcsa: Az agykéreg II.

Az agykéreg fejlődése, embriológiája

Az első idegrendszeri sejtek, melyek az agyhólyagok falának belső és külső felszínét kötik össze egymással a radiális gliasejtek. Ők az ácsok, akik az agy állványzatát létrehozzák. A radiális latinul sugár-irányút jelent, ez utal arra, hogy ezek a sejtek a hólyag felszínére merőlegesen nyúlnak meg, a középponttól kifelé. Ahogy a hólyag fala idegrendszerré vastagodik, a radiális gliasejtek egyre jobban megnyúlnak és folyamatosan osztódnak (dagad a kürtőskalács). Egy idő után a radiális gliasejtek úgy osztódnak, hogy egyik leánysejtjük megmarad radiális gliasejtnek, másikukból pedig különböző idegrendszeri sejteket kialakító progenitor (előd) sejtek lesznek.

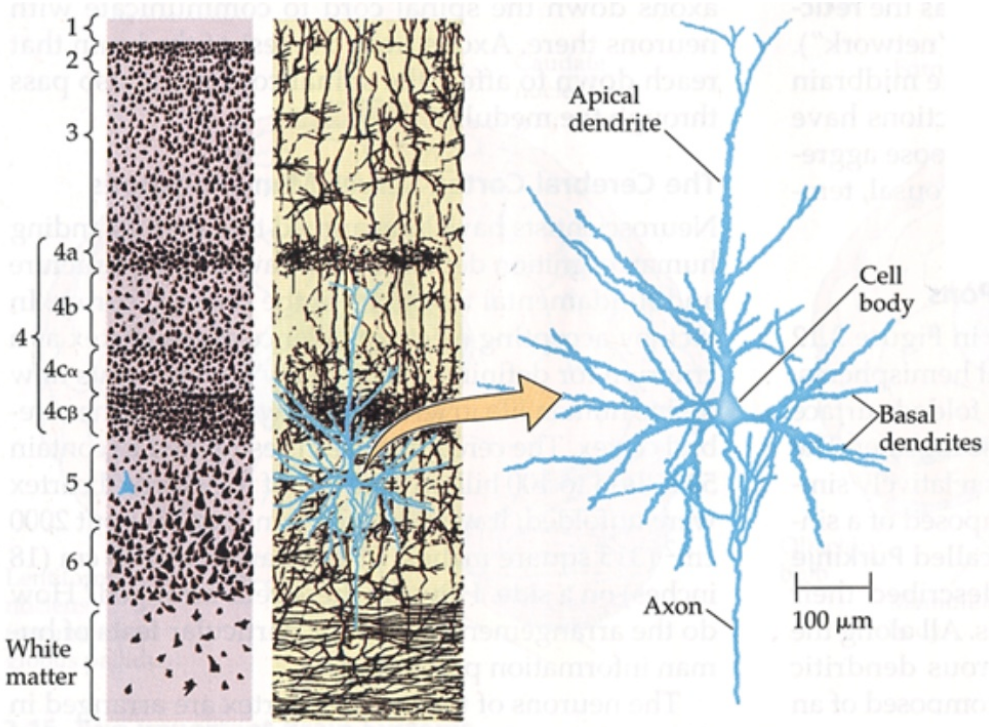


A fejlődő agykéreg vázlata. A velőcső üregéhez közel ülnek a kékkel jelölt radiális gliasejtek, melyeknek felfele futó nyúlványai mentén vándorolnak a belőlük keletkezett idegsejtek (világos barna), illetve a zölddel jelölt progenitor sejtek, melyekből további progenitor sejtek, ideg és gliasejtek keletkeznek. A helyükre került idegsejteket az ábra piros színnel mutatja. A sejtek osztódását körkörös, egymásba alakulását egyenes nyilak mutatják.e)

Ők hozzák létre további osztódással fajtájuktól függően az idegsejteket, illetve a gliasejtek két típusát az asztrocitákat (szinonimájuk: asztroglia sejtek) és az oligodendrocitákat (oligodenroglia sejtek).
Az első idegsejtek a hólyag falának belső felszínéhez közel keletkeznek, majd hamarosan elkezdik növeszteni dendritjeiket a hólyag falának külső felszíne felé, axonjaikat pedig a hólyag belső felszíne felé. Ezek a helyben képződött idegsejtek serkentő sejtek, glutamátot használ ingerületátvivő anyagként és az agykéreg területek belső, illetve más területek felé futó kapcsolatrendszerét alkotják axonjaik útján.

Itt álljunk meg egy kicsit megtanulni mi merre van. A hólyagfal külső felszínét, ami majd a koponyacsonthoz simul, apikális = csúcsi felszínnek mondják, itt alakulnak majd ki az agy felszínét borító agyhártyák a lágy és az ezt borító kemény agyhártya (pia mater és dura mater). A hólyagfal belső felszínét bazális = alapi felszínnek mondják és mivel erre futnak le a kialakuló idegsejtek axonkötegei itt alakul ki majd a fehérállomány, mely összeköti az agyterületeket. A fehérállomány azért fehér, mert az idegsejtek axonjait a gyorsabb ingerületvezetés érdekében az oligodenroglia sejtek ellaposodott feltekeredett, magas zsírtartalmú nyúlványai szigetelik. A sokszorosan feltekeredett, magas zsírtartalmú sejthártyák szórják a fényt és fehér színt adnak ennek az állománynak. Az idegsejtek rétege, az agykéreg működésének terepe pedig a szürke állomány. A kürtőskalács hasonlatot használva a kalács külső cukormázos felszíne, ahol az agyhártyák vannak és amerre a dendritek futnak, a finom puha tésztaréteg a szürkeállomány, melyből a kalács ürege felé szaladnak az axonok. Az idegsejtek tehát a radiális irányba (a fehérállományt és az agyfelszínt összekötő irány) polarizáltak (van apikális = csúcsi és bazális = alapi végük). A másik irányt, amit meg kell jegyezni erre merőleges, az agyhólyag felszínével párhuzamos, horizontálisnak hívják. Használni fogjuk még a fel és le irányokat, ezek az agyfelszín és a

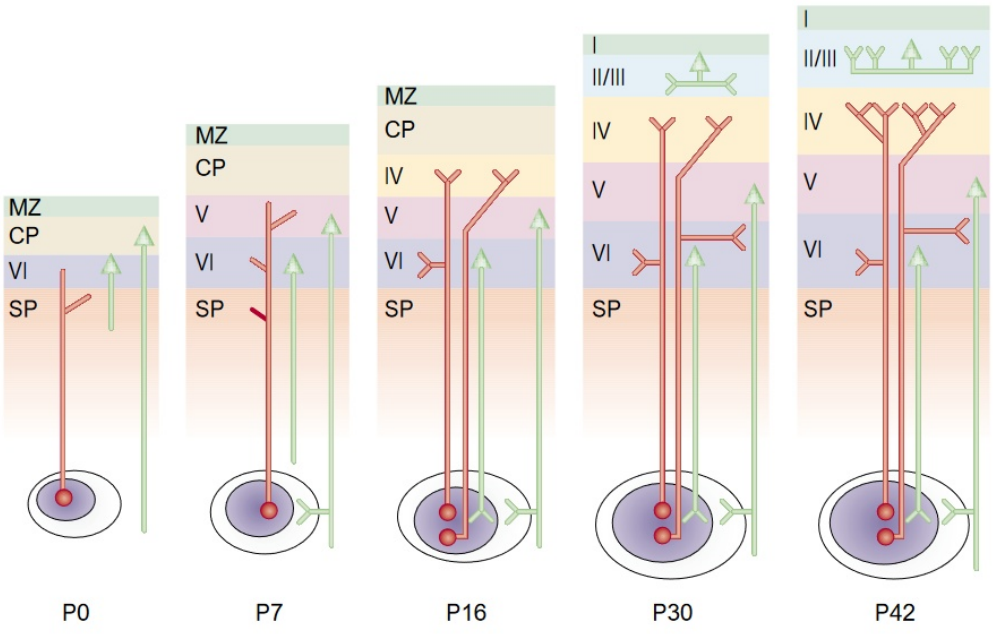
fehérállomány fele mutatnak.



Bal oldalt egy tipikus 6 rétegű agykéreg metszet látható két festéssel. A balabbikon Nissl festés azonosítja a sejttestek eloszlását, a jobbikon Golgi festés mutatja be a sejtek egy részének nyúlványrendszerét. Felfelé található az apikális (csúcsi) irány, lefelé a bazális (alapi) irány amerre a kéregterültetet elhagyó axonok futnak a fehérállomány felé. A kéreg felszínét a pia és dura mater, azaz a lágy és keményagyhártya fedi. A jobb oldalon egy tipikus agykérgi serkentősejt, egy piramissejt látható. Felfelé futó vastag dendritjét apikális dendritnek, le-oldalra futó dendritjeit bazális dendriteknek nevezik. Axonja lefelé, a fehér állomány felé indul. A sejt hossztengelye a radiális irányt jelöli ki, erre merőleges a horizontális, mely párhuzamos a rétegek határával.

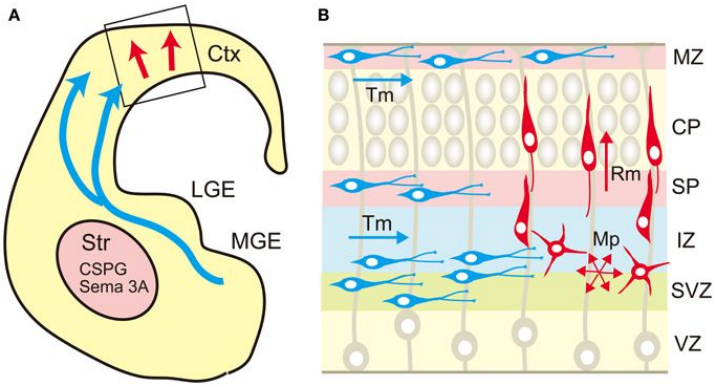
Az elsőként keletkezett és az archicortexben az egyetlen idegsejtréteget alkotó (serkentő)sejtek az agyhólyag belső fala közelében maradnak, de elágazó dendritjeiket mind a bazális, mind az apikális irányba küldik, és ezzel a sejtréteg mellett dendritikus rétegeket is alkotnak. Ezek a háztetőkről felfele és a teraszokról lefele kiálló antennák, amelyek a jeleket fogják. Szerepük, hogy a más agyterületekről ide érkező ingereket szállító axonoktól bemeneteket (jeleket) kapjanak. A szürkeállományba (a sejtek közé) belépő axonok a dendritekre merőlegesen, horizontális irányba (az agyfelszínnel párhuzamosan) futnak, így a lehető legtöbb radiális (agyfelszínre merőlegesen futó) dendritet keresztezik és a lehető legtöbb kapcsolatot alkotják (emlékeztek a mátrix memóriára és a kétrétegű hálózatokban egymást keresztező axonok és dendritek között kialakuló szinaptikus kapcsolatokra?).
Az agykéreg evolúciója során annak felépítése úgy bonyolódott, hogy az agykamra közelében kialakuló idegsejtek további csoportjai az agyfelszín felé vándorolva átléptek a legelső sejtcsoporton és fölöttük újabb rétegeket alakítottak ki. A később megjelenő paleocortexben 2-3, a modern neocortexben 5 sejtréteg alakult ki. A neocortexnek van egy 6. rétege is, az agyfelszín közelben. Ez elsősorban csak dendriteket tartalmaz, ide futnak ki az alsó 5 rétegben található sejtek csúcsi dendritjei.

A folyamatot, hogy a sejtek a már korábban lehorgonyzott sejtek fölé az agyfelszín irányában helyezkednek el everziónak hívják. Látszólag értelmetlen, hogy miért nem a már meglevő sejtek alatt állnak meg keletkezésük után, miért vándorolnak föléjük? Ennek mély evolúciós oka van. Mint majd a részletes agykéreg anatómiánál látni fogjuk, a mélyebb rétegi sejtek az agy ősibb területeivel vannak összekötve, a felszínesebben elhelyezkedők,



Az egymás után kialakuló rétegek szerkezete és a kiépülő kapcsolatok célterületei a menyét látókérgében a születést követő 42 napban. Az agykéregbe információt szállító és onnan kapó talamuszt az alul található elliptikus terület mutatja. Az ábra nem mutatja az agyterületek közötti kapcsolatokat..

pedig az evolúciósan később kialakult területek felé küldenek axonokat. Ahogy az agy bonyolódott az evolúció során, és egyre újabb területek alakultak ki, az egyes kéregterületeken újabb rétegek jelentek meg a már meglévő és régi területekhez horgonyzottak fölött. Ezek a rétegek alkottak azután kapcsolatokat az újonnan megjelenő területekkel. Ezt az embrionális fejlődés megörökölte őseinktől, és az agykérgi serkentő sejteknek a fejlődés során át kell verekedniük magukat a korábbiakon, akik addigra már bezsinórozták magukat a hálózatba. Hasonlóan, mint amikor egy unalmas de kötelező előadáson először a hátsó sorok telnek meg, majd ahogy egyre többen érkeznek a terem végében levő ajtón, át kell furakodniuk a már letelepedettek között, az elsőbb sorokba.



A serknető és gátló neuronok vándorlása az agykéreg kialakulása során. Bal oldalt a fejlődő agy keresztmetszete. Kék nyilak mutatják a hosszú útvonalat amin keresztül a ganglionik eminence-ben keletkezett gátlósejtek a távoli agykéregbe vándorolnak. A serkentő sejtek az agyhólyag falának alján keletkeznek és csak rövid utat tesznek meg (piros nyilak). Jobboldalt a fejlődő agykéreg rajza. A gátlósejtek (kék) horizontálisan, oldal irányba vándorolnak nagy távolságra az oligodendrociták irányításával. A serkentő sejtek radiálisan, függőleges irányba mozdulnak el a radiális gliák mentén.

A kialakult agykéregben a serkentő sejtek mellet gátlósejtek is találhatók. Rájuk azért van szükség, mert egy csak serkentő elemekből álló rendszer nem tud megbízhatóan működni. Biztos volt már mindenkinek olyan élménye, amikor egy koncerten egyszer csak iszonyú gerjedést lehetett hallani. Valamit elrontott a hangmérnök és a túl nagy erősítéstől a hangszóróból erős jel került a mikrofonba, amit az erősítő tovább erősített és a hangszóróból az erősített jel ismét eljutott a mikrofonba. Ez a pozitívan visszacsatolt kör aztán elszabadult hangerőhöz vezetett. Nos, ha az agyban történik ilyesmi, azt epilepsziás rohamnak nevezik. A roham alatt a serkentő sejtek egyre nagyobb csoportjai aktiválják egyre erősebben egymást, kölcsönösen. Erre a veszélyre az evolúció is „rájött", ezért a felépülő serkentősejt hálózatokba az agyhólyag falnak két területéről (középső és oldalsó ganglionic eminence) horizontális irányban gátlósejtek kezdenek vándorolni, majd a megfelelő helyen és időben gátló kapcsolatrendszereket alakítanak ki a megfelelő rétegek megfelelő serkentő sejtjeivel, hogy azok működését az egészséges tartományban tartsák. Erről még bőven lesz szó, mivel ezzel kerestem a kenyeremet és ehhez értek igazán. Mire az agykéreg „elkészül", a sejtek 10-20%-a gátlósejt lesz, melyek képesek a működés finom szabályozására. Az evolúció utólagos hekkelése ott is látszik, hogy a fejlettebb agyakban, illetve az agyak később kialakult, magasabb rendű feldolgozást végző területein a gátlósejtek aránya inkább a 20%-hoz van közelebb, mint a 10%-hoz.



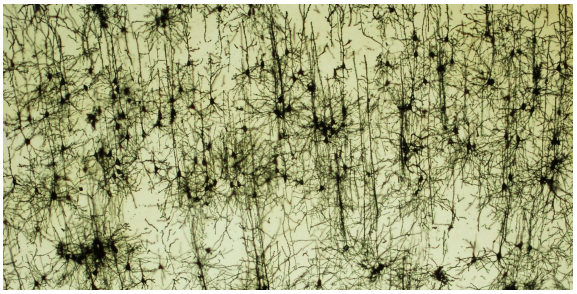
Túlvezérelt erősítés hatása.

Legközelebb tovább cizelláljuk a kérgi kapcsolatrendszerek törvényszerűségeit.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agykérgi modulok szerveződési alapelvei

Most, hogy tudjuk hogyan alakult ki az agykéreg és hogyan fejlődik embrionálisan, nézzük meg finomszerkezete milyen alapelvek alapján szerveződik.
A lényeg a két agyfélteke felszínét borító a szürke állományban van, hiszen ott találhatók az idegsejtek és ott zajlik az információ feldolgozása. A szürke állomány (fajtól függően) 1-3 mm vastag és köbmilliméterenként 15-150 ezer idegsejt található. Az ember szürke állománya vastagabb, és az egérnél jelentősen kevesebb, de sokkal kiterjedtebb kapcsolatrendszerrel rendelkező idegsejtet tartalmaz ugyanakkora térfogatban. A szürke állomány alatt található fehérállományban az idegsejtekről eredő, a különböző részfeladatokat megoldó agyterületek között információt továbbító axonkötegek futnak. A fehérállomány az agy kábelkötegeit szigetelő mielinhüvelytől fehér és az agy tényleges térfogatának tetemes részét teszi ki.

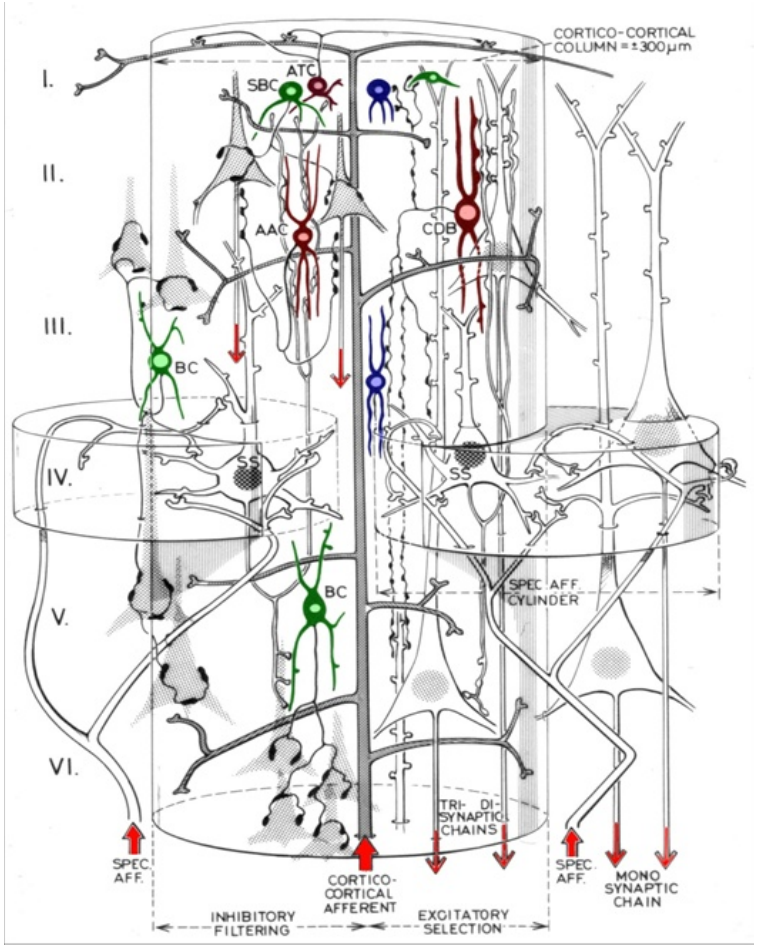


Agykéreg Golgi festéssel. A festés a sejtek egy kis részének teljes nyúlványrendszerét kirajzolja. Jól látszanak a serkentő piramissejtek függőlegesen futó csúcsi dendritjei, melyek kirajzolják az agykérgi oszlopokat (kolumnák).

Ha mikroszkóppal megnézünk egy agykérgi területből készült metszetet (természetesen megfelelő anatómiai festés után), azt láthatjuk, hogy az agykéregben a sejtek radiális (függőleges) irányba futó oszlopokba szerveződnek és erre merőlegesen rétegekbe rendeződnek. A sejtoszlopok szerkezete egy kéregterületen belül hasonló, eltérő feladatú agyterületek között kicsit eltérő.
Ha az agykéreg felépítéséről beszélek mindig Szentágothai János akvarelljét mutatom. Ezen jól látszanak a szerveződési alapelvek.

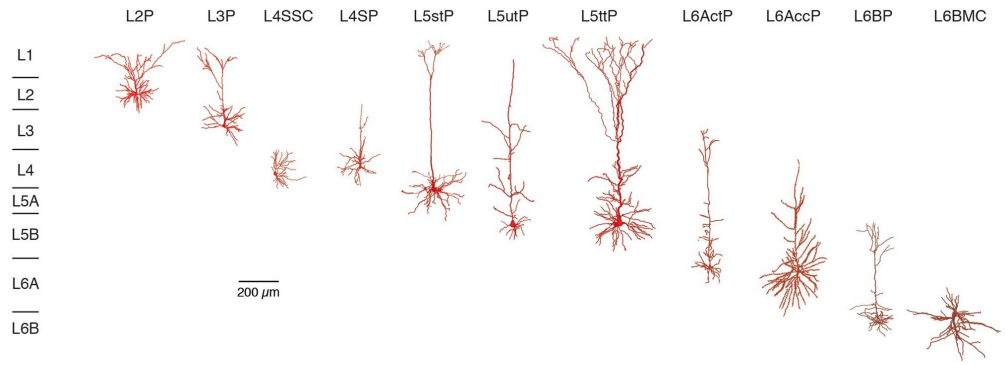
Az első alapelv - mint kicsit fentebb bemutattuk: **az agykéreg serkentő és gátlósejtekből épül fel**. A neocortex hat rétegéből csak ötben (II-VI. rétegek) találhatók serkentő sejtek. Ezek az agyi idegsejtek 85-90%-át adják, legjellegzetesebb képviselőik a piramis alakú sejttesttel rendelkező piramis sejtek, melyeknek csúcsi dendritje függőlegesen az agykéreg felszíne felé futva több rétegben alkot oldalágat (ezek az apikális dendritek). Többi, a sejt alapjánál található dendritjei pedig ferdén lefelé futnak a fehérállomány felé (bazális dendritek). **A serkentő sejtek alkotják az agykéreg információ feldolgozó állványzatát.** A serkentő sejtek axonjai hozzák létre az agyterületeket összekötő pályákat, de ezek mellett a távoli kapcsolatok mellett jelentős helyi kapcsoltarendszert is alkotnak szomszédos sejteken. Az agykérgi szinapszisok zöme serkentő, mely más serkentő sejteken végződik. Ezek a kapcsolatok a Hebb szabály alapján módosulnak, azaz a serkentő sejtek kapcsolatrendszerében tárolódik a memória és aktivitásuk mintázata, illetve változása kódolja az információt és végzi ennek feldolgozását.
A gátlósejtek a csavarok, melyek a serkentősejtek által alkotott információfeldolgozó vázat biztonságos szerkezetté teszik, azáltal, hogy nem serkentik, hanem gátolják más sejtek működését. Így képesek a hálózat működését az egészséges agyműködéshez szükséges szinten és mintázatban tartani. Számos dologban eltérnek a serkentő sejtektől. Változatos típusokba sorolhatók szerkezetük (anatómia) és működésük (fiziológia és farmakológia) alapján. Anatómiai jellegzetességük, hogy mely rétegekben találhatók, honnan gyűjtik bemenetüket, illetve, működésük szempontjából legfontosabban, hova küldik axonjaikat, a serkentő sejtek felszínén hol végződnek. Csoportosíthatók még annak alapján is, hogy milyen elektrofiziológiai tulajdonságaik vannak, azaz milyen aktivitási mintázatokat mutatnak. Ezzel még nincs vége, neurokémiai és farmakológiai tulajdonságaikban is eltérhetnek, azaz milyen jellegzetes marker (jelölő) molekulákat, moduláló transzmitter receptorokat vagy ioncsatornákat fejeznek ki. Az anatómiai, élettani

és farmakológia tulajdonságok gyakran együtt járnak, de vannak olyan sejtcsaládok, ahol ezek többé-kevésbé szabadon kombinálódnak.



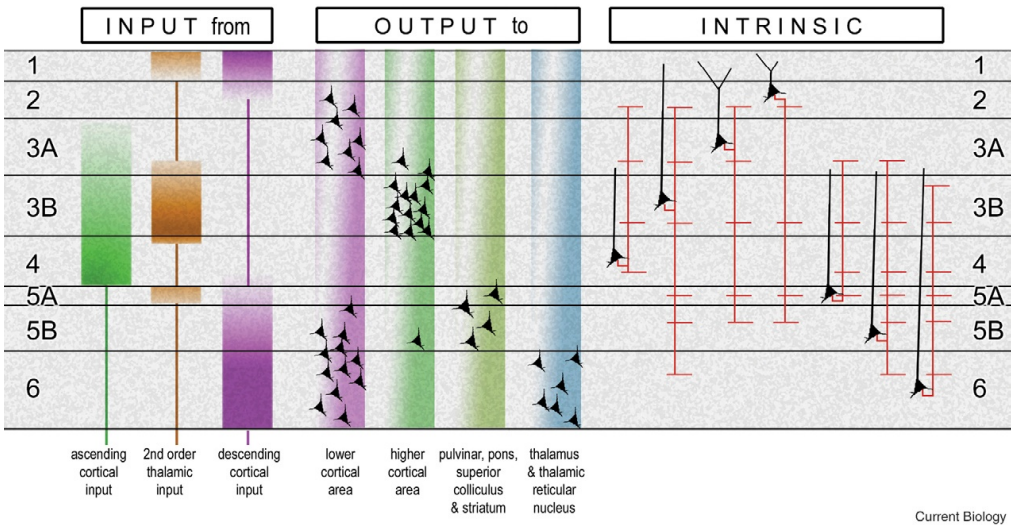
Szentágothai János akvarellje, mely bemutatja az agykérgi oszlopok szerveződését. Az információfeldolgozó serkentő sejtek feketék, a hálózat biztonságos működéséért felelős gátlósejtek színesek. Piros nyilak jelzik a megfelelő rétegekbe érkező és onnan eredő be és kimeneti pályákat.

A második alapelv, hogy az agykéregben **a sejtek rétegekbe szerveződnek**, melyeket, a bennük található serkentő sejtek sejttestének eloszlása rajzol ki. Az egyes agykérgi területek rétegeiben kicsit más méretű és dendritszerkezetű serkentő sejtek találhatók, eltérő sűrűségben. A IV. rétegben a serkentő sejtek tüskés csillagsejtek, a többi rétegben piramis sejtek. Az eltérő elhelyezkedésű sejtek dendritjei elsősorban saját oszlopukon belül futva érnek el más rétegekbe, ahol sejttípusra jellemző mennyiségű dendritágat adnak. A sejtek axonjai, megint rétegbeli helyzetüktől függően, a sejt oszlopán belül más rétegekbe, szomszédos oszlopok rétegeibe, illetve más agyterületekre küldenek axonokat. Ott is persze a megfelelő rétegekbe. A II-VI. réteg serkentő sejtjei között, illetve az I. rétegben az agykérgi idegsejtek maradék 10-15%-át kitevő gátlósejtek találhatók, melyeknek dendrit és axonág rendszere jelentősen változatosabb, mint a serkentő piramis sejteké.



Egy elsődlege érző agykéreg egyes rétegeiben található serkentő sejtek alakjának listája. A IV. rétegben (L4) tüskés csillagsejtek találhatóók, a többi réteget a jellegzetes agykérgi piramissejtek eltérő méretű és dendritelágazás rendszerű változatai töltik meg.

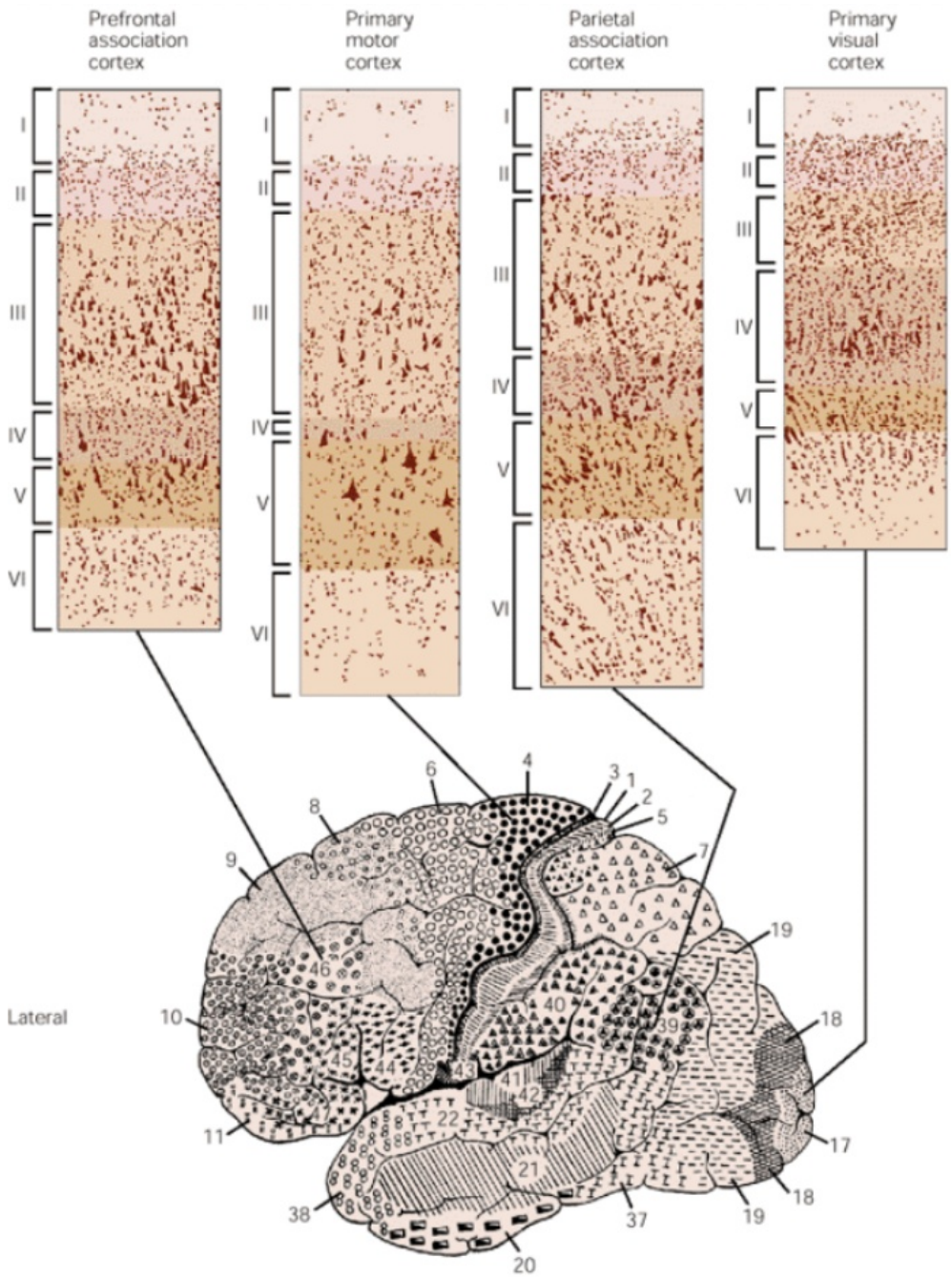
A harmadik szerveződési alapelv, hogy nem csak a serkentő és gátlósejtek mutatnak réteges elrendeződést, hanem az agykéregbe a különböző területekről érkező **bemenetek is különböző rétegekbe érkeznek** és ágaznak el, illetve **a különböző rétegekben található serkentő sejtek eltérő agyterületekre vetítenek.** A bemenetek rétegzettsége, valamint az a tény, hogy az eltérő rétegekben található serkentő sejtek (legtöbbjük piramis sejt) dendritfája kicsit más sűrűséggel ágazik el az egyes rétegekben, azt eredményezi, hogy az egyes rétegek serkentő sejtjei más arányban mintavételezik a távoli területekről érkező bemeneteket, ezért máshogy összegzett (integrált) információt továbbítanak egyedi célterületeik felé. Másra figyelnek, ezért másról beszélnek. Ahogy a nagypapa és a nagymama is más újságot, más könyvet olvas, a világról alkotott képük is más lesz és másról beszélnek unokáiknak.



A három részből álló ábra bal oldalán a kéreg rétegeibe érkező bemenetek, középen az onnan eredő kimenetek, a jobb oldalon pedig a kérgi oszlop belső kapcsolatrendszere látható.

Azt, hogy melyik réteg sejtjei honnan kapnak bemenetet és mely területekre vetítenek viszonylag egyszerű és levezethető az agykérgi rétegek megjelenési sorrendjének logikájából. Majd látni fogjuk, hogy az ingerek feldolgozásában az agykérgek egy hierarchikus, több lépcsős láncolatot alkotnak. A lánc egyes állomásain álló agykérgeknek kicsit

más feladatot kell megoldania, mert máshonnan kapják, a máshogy feldolgozott bemeneteket.



A feldolgozási láncban eltérő szerepet betöltő agykérgi területek felépítésének hasonlóságai és eltérései. Alul az agy felszínén jelölve vannak a Brodman által megfigyelt, kicsit eltérő felépítésű kérgi területek. A felső sorban a második oszlop az elsődleges mozgató kérget, a negyedik az elsődleges látókérget mutatja be. A mozgató kéreg erős kimenetet ad az V. és VI. rétegből az agy ősibb területei felé. A látókéreg pedig erős bemenetet kap a IV. rétegbe a talamusból. Az első és harmadik két asszociációs kéreg változatot mutat be. Ezeken a területeken a rétegek aránya viszonylag egyenletes. A II-III. réteg kicsit kifejezettebb, mivel ezek az agyterületek erős kapcsolatokat alkotnak más kérgi területekkel.

Ennek megfelelően eltérő a 6 rétegben található serkentő sejtek mennyisége, és ezért a rétegek vastagsága. A legegyszerűbb láncban egy érzőkéreg egy asszociációs területnek, majd az a mozgató kéregnek továbbítja az információt. Mivel az érző kéreg elsősorban bemenetet kap az érzékszervektől a kéreg alatti területeken keresztül, itt a bemeneti rétegek a legvastagabbak. Történetesen az

agykéreg fő bemeneti rétege a IV. réteg, ide érkeznek ugyanis a talamuszból (az agykéreg fő bemenet szállító területéről) a jelek. A mozgató kérgekben a IV. réteg vékony (hiszen nem kap erős talamikus bemenetet), cserébe az V. és kisebb mértékben a VI. réteg vastag, mivel innen indulnak a kéreg alatti területek felé a mozgató pályák. Az információ tervezésben és feldolgozásban legfontosabb asszociációs kérgekben (melyek az emberi agykéreg legnagyobb részét alkotják) a rétegek vastagsága kiegyensúlyozott, hiszen kapnak is meg adnak is jelentős mennyiségű kapcsolatot. Talán a III. réteg kicsit kifejezettebb, mivel ez az a réteg, amiben a más asszociációs területekkel információcserében álló sejtek zöme található.

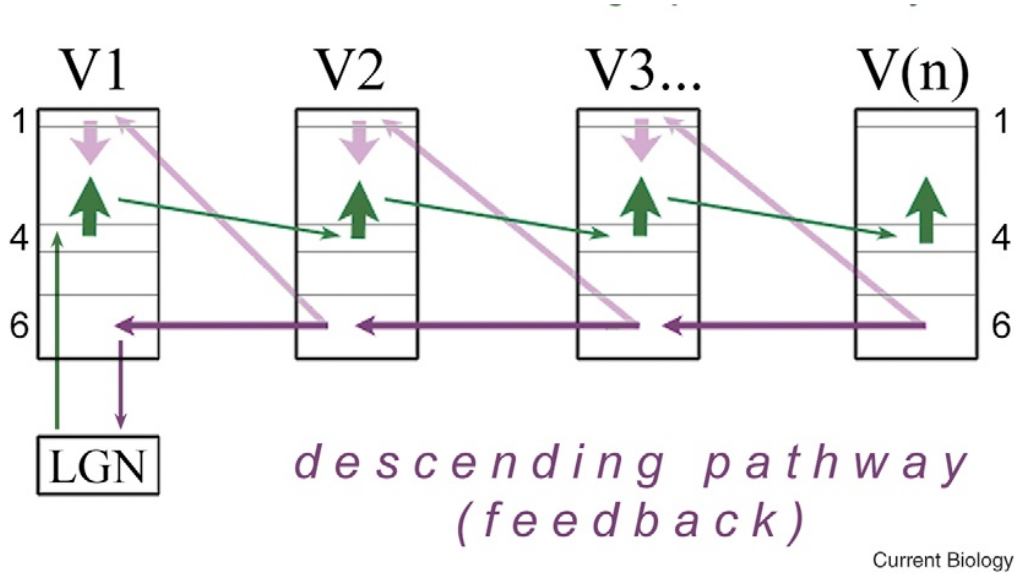
Folyt köv.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agykérgi oszlop finomszerkezete: mit csinálnak az egyes rétegek?

Az agykéreg azért képes bonyolult feladatok rugalmas megoldására, mert számos egyedi feladat elvégzésére képes területből áll, melyek a feladat függvényében képesek kölcsönhatni. Mint azt Brodman megfigyelte, az egyes területek belső felépítése kicsit eltér, agykérgi oszlopaik szerkezete a tipikus oszlopmodell finom változatait tartalmazza, melynek eredményeként máshogy integrálják a többi agykérgi és kéreg alatti területről érkező jeleket. Az eredményt pedig, a feldolgozási láncban elfoglalt helyük szerint továbbítják más (alacsonyabb vagy magasabb) agykérgi, valamint kéreg alatti területek felé.

A sokféle irányból érkező bemenetek fogadására, illetve az eltérő irányba küldendő kimenetek eredetére az agykéreg különböző rétegei szakosodtak.



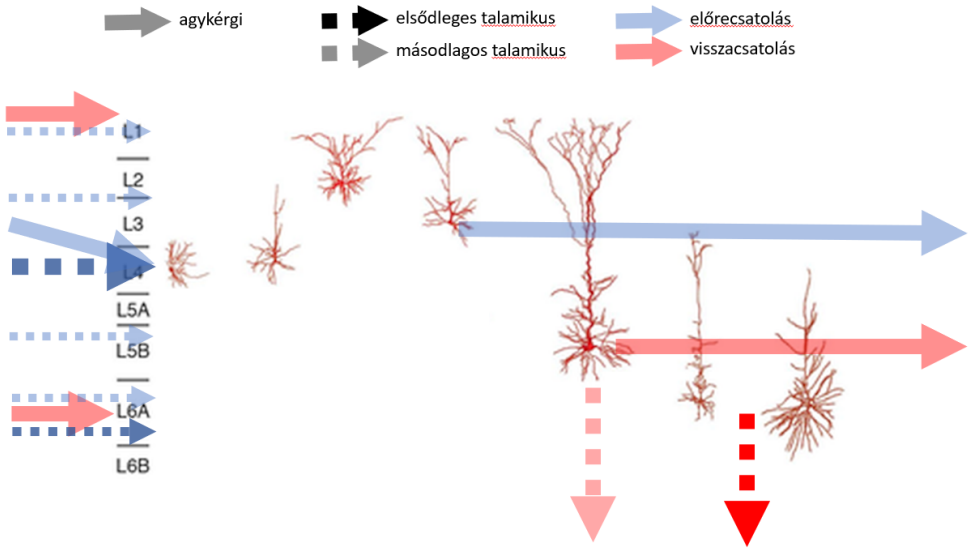
Az információáramlás iránya a különböző agykérgi rétegek között. A magasabb területek IV. rétege kapja a III. rétegből előrecsatolt információt (zöld nyilak). A VI. réteg sejtjei pedig az alacsonyabb területek I. és VI. rétegébe vetítenek vissza (lila nyilak).

Az agykérgi oszlopokban az információ két irányban áramlik. Egyrészt az oszlopon belül, függőlegesen a rétegek között (ez segíti elő a különböző bemenetek kölcsönhatását), másrészt vízszintesen az oszlopok vagy altérő agykérgi területek oszlopai között (ez a

finomabb feldolgozást segíti).

Az oszlopok finomszerkezetének megértéséhez két dolgot kell megtárgyaljunk: 1) mi jellemző az egyes rétegekre, 2) hogyan áramlik az információ a rétegek között.

I. réteg (távoli kommunikáció): Itt nem találhatók serkentő sejtek, csak gátlósejtek, viszont a IV. réteg kivételével minden rétegben találhatók olyan piramis sejtek melyeknek csúcsi dendritje felfut ide és kiterül a kéregfelszínnel párhuzamosan. Ebbe a rétegbe érkeznek a szintén a kéregfelszínnel párhuzamosan futó (horizontális), magasabb agykérgi területekről érkező leszálló, visszacsatoló ingerek és a magasabb rendű talamikus magvak bemenetei. Mivel a sejtek csúcsi dendritje hosszasan párhuzamosan fut a sok helyről érkező bemeneti axonokkal ezért ez a réteg felelős a sejtek működésének finomhangolásáért, a figyelem, a kontextus és az aktuális elvárások befolyásoló hatásának integrálásáért. Az itt bejövő információk kicsit olyanok, mint a boltan vagy a kocsma háttérzajában tetszőleges témában hallható pletykák. Nem nagyon fontosak, de jó tudni róluk és befolyásolhatják döntéseinket.
II. réteg (rövidtávú kérgi kapcsolatok): Itt kisméretű piramissejtek találhatók melyek összeköttetésben vannak más II. rétegi sejtekkel az oszlopon belül, illetve a saját agykérgi terület más oszlopaiba vetítenek horizontálisan, azaz oldal irányba. Szerepük a dolgok alapos átbeszélése a hasonszőrűekkel. Afféle helyi klubbot alkotnak, ahol a közösségben előforduló híreket cserélik az emberek.
III. réteg (hosszútávú, előrecsatolt kérgi kapcsolatok): Itt kicsit nagyobb piramissejtek találhatók, de ők távolabbi agyterületek sejtjeivel és az ellenoldali agyterületekkel alkotnak horizontális, nagyobb távolságú oldal irányú kapcsolatokat. Azokban a kérgi területekben, ahol nincs IV. réteg ide a magasabb rendű talamikus magvakból érkezik erős bemenet. Az agykérgi feldolgozási láncban (hierachiában) a magasabb szintű agyterületek IV. rétegébe (alacsonyabb feldolgozási szintről érkező jelek fogadó rétege) továbbítják a feldolgozott információt. Ők az újságíró irodáknak felelnek meg, melyek távoli híreket kapnak és továbbítják a médiákba.
A II/III. réteg a magasabb rendű talamusz magokból is kap bemenetet, melyek a kéreg - talamusz körben keletkezett, több kérgi terület információjának összeolvasztásából származó információt szállítják.



A kéreg rétegeinek be (baloldal) és kimeneteit (jobboldal): Az alacsonyabb feldolgozási területekről érkező és a magasabb területekre irányuló előrecsatoló be-/ki-meneteket kék, a magasabb területekről érkező, vagy az alacsonyabb területekre induló visszacsatoló be-/ki-meneteket piros nyilak jelölik. Az agykérgi vetítéseket tömör nyilak a talamikus vetítéseket szaggatott nyilak jelölik. Az elsődleges, specifikus (látás, hallás, tapintás) talamusz vetítések erős, a másodlagos, nem specifikus (magasabb rendű kéregterülettel kapcsolatban álló) talamusz vetítéseket halvány nyilak jelölik.

IV. réteg (a bemeneti réteg): Itt csak tüskés csillagsejtek találhatók, piramis sejtek nem. Azaz a dendritjeik legnagyobbrészt ebben a rétegben futnak, hiszen ők fogadják elsősorban az agykéregbe az alacsonyabb területekről (talamusz, a feldolgozási láncban alacsonyabban álló kéregterület) érkező bemeneteket, illetve más tüskés csillagsejtekkel vannak összekötve. Ők leginkább a rendőrségi kihallgatáson jelen levő írnokra hasonlítanak, aki hűségesen lejegyzi mi történik, hogy aztán majd a nyomozók meg a bíróság dolgozhasson belőle.
V. réteg (a kimeneti réteg, visszacsatoló kapcsolatok): Itt nagy piramissejtek találhatók, melyek az agykéreg által feldolgozott információt kéreg alatti területekre (striátum, colliculus superior, agytörzs, gerincvelő) és alacsonyabb feldolgozási szinten álló agykérgek I. és VI. rétegébe küldik vissza. Jelet küldenek még a magasabbrendű talamikus magvakba. Ezáltal fontosak az alacsonyabb területek feldolgozásának segítésében, pontosításában és visszacsatolásos hurkok útján a különböző agyi területekről érkező információk összeolvasztásáért. A mozgatókéregből eredő, a mozgásszabályozásban elsőrendű fontosságú piramispálya az V. réteg sejtjeiből ered. Ők a forgalomirányítók, akik a megrendelések, a forgalomfigyelés és a napszaknak megfelelően irányítják egy csomagszállító flotta futárjait, hogy hatékonyan a megfelelő időben és helyen legyenek.
VI. réteg (kommunikáció a talamusszal): Hasonlóan nagy piramissejtekből épül fel, mint az V. réteg, de ők talamikus bemenetet is kapnak. Kimenetüket szintén lefelé küldik, de ők körülírtan a talamusz alacsonyabb rendű magjaiba, melyek az egyes érző kéregterületek fő bemeneteit szállítják, ezért fontosak a talamusz-agykéreg információ feldolgozó körében. Az agykérgi vetítések tekintetében a VI. réteg és az V. réteg közötti különbség hasonló a II. és III. réteg közötti különbséghez: a VI. réteg közelebbi agyterületekre és oszlopon belül (illetve meghatározott talamusz magvakba) küld információt, az V. réteg messzebbre és az ellenoldali féltekébe (illetve mélyebb, általánosabb agyi területekre). De ugye míg a II/III. rétegek piramissejtjei a feldolgozási láncban előre, addig az V/VI. rétegek sejtjei a feldolgozási láncban visszafelé küldenek információt. A VI. réteg sejtjeinek szerepe leginkább a főnök titkárnőjére hajaz, segítenek helyben a cégen belül a döntéseket és a visszacsatolásokat eljuttatni a megfelelő helyre, illetve más titkárnőkkel egyeztetni (lásd fókuszált vetítések a talamuszba).
Az V/VI. réteg a magasabb rendű talamikus magokból is kap bemenetet, hasonlóan a II/III.

réteghez

Összefoglalva a IV. réteg az elsődleges információ fogadó réteg, ezt a réteget granuláris, szemcsés rétegnek is hívják, mivel nem piramissejteket, hanem kisebb, gömbölyűbb denritfájú tüskés-csillagsejteket tartalmaz. A felette lévő, supragranulárisnak nevezett II. és III. réteg a magasabb feldolgozási szintű kéregterületek felé, az alatta lévő, infragranuláris V. és VI. réteg pedig az alacsonyabb feldolgozási szintű területek felé küld információt.

A következőben a rétegek és oszlopok közötti információáramlásról lesz szó.

Szerző: **Gulyás Attila**

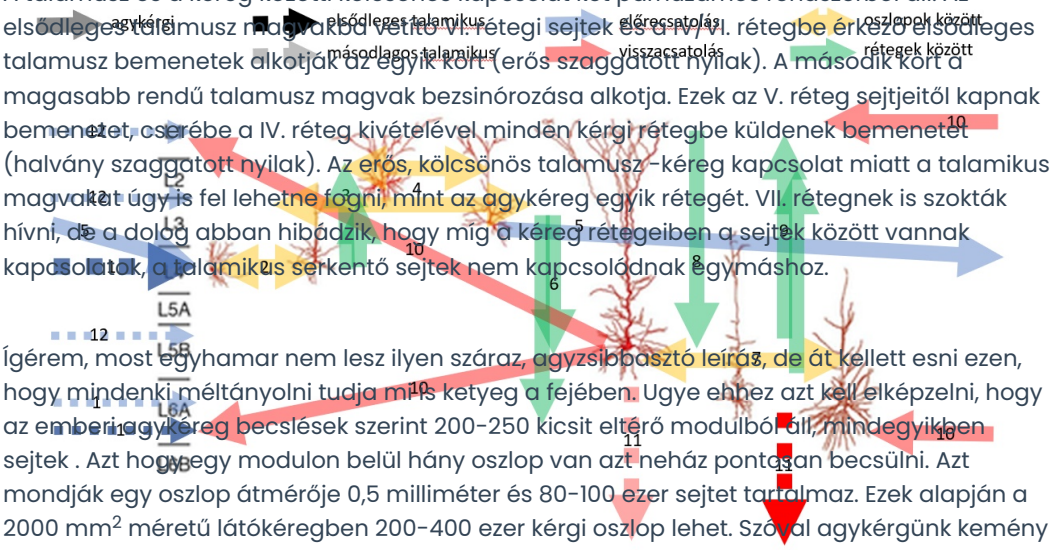
Az agykérgi oszlop finomszerkezete: hogyan áramlik az információ az oszlopokon belül, az oszlopok és az agyterületek között?

Az egyes rétegek külső kapcsolatrendszere után nézzük meg hogyan is áramlanak a jelek egy agykérgi modulban, ezzel egy kicsit az agykéregfejlődés evolúciós lépéseit is visszajátszhatjuk.

Egy kérgi oszlop elsődleges előrecsatolt (a feldolgozási láncban korábbi helyről érkező) bemenet fogadó rétege a IV. réteg (és kisebb mértékben a VI.). Az érző kérgekben ide érkeznek a talamuszból a jelek (1), a magasabb feldolgozási szinten lévő agykérgek pedig ide kapják az alacsonyabb kérgek III. rétegéből érkező előrecsatolt jeleket (5). Az itt elhelyezkedő tüskés csillagsejteknek nincsenek csúcsi dendritjei, csak ebből a rétegből gyűjtenek bemeneteket, majd az egymás közötti kapcsolataik útján a jeleket feldolgozzák (2), majd a II/III. rétegek felé továbbítják (3). Innen további feldolgozás után (4, oszlopok és agyterületek közötti kölcsönhatások) az információt a II/III. réteg sejtjei tovább küldik közeli (II. réteg sejtjei) és magasabb kérgi területek IV. rétegébe (III. réteg sejtjei) (5), illetve a kérgi oszlopon belül leküldik az V/VI. réteg sejtjei felé (6). Ezek a sejtek aztán további feldolgozást végeznek egyrészt egymás között, egymással alkotott axonjaik útján (7), másrészt beolvasztják a felsőbb rétegekbe (elsősorban az I.) érkező információt (8). A feldolgozott információt egyrészt visszaküldik a II/III. rétegek felé (9), másrészt kéreg alatti területekre, magasabb rendű talamikus magokba és alacsonyabb kérgi területek I. és VI. rétegébe (10, V. rétegből), illetve a talamuszba (11, VI.rétegből).

A IV. rétegbe érkező viszonylag precíz, előrecsatolt bemenetek (1) mellett egy agykérgi oszlopba leszálló, visszacsatolt bemenetek is érkeznek az I. és VI. rétegekbe magasabb feldolgozási szinten álló kérgek V. rétegi sejtjeitől (10). Az I. rétegbe számos távoli területről érkeznek szétszórtan szaladó, információt szállító axonok, melyek a legtöbb réteg piramissejtjeinek csúcsi dendritjén végződnek. A VI. rétegbe a feldolgozási láncban közel álló magasabb rendű területek küldenek jelet, pontosan hatékonyan.
Egy agykérgi oszlopban az információ áramolhat tehát függőlegesen, a rétegek között: alacsonyabb szintű bemenet -> IV. -> II/III -> V/VI. -> II/III. irányba. De kölcsönös információáramlás figyelhető meg a IV., II/III. és V/VI. rétegekben is horizontális, azaz oldalirányba. A II. és VI. rétegben viszonylag közeli kölcsönhatások, a III. és V. rétegben távoli, más agyterületekkel is történő kölcsönhatások zajlanak. A legtávolabbi kölcsönhatások az I. rétegen keresztül közvetítődnek, ide érkeznek a magasabb területek V. rétegi piramissejtjeitől és a magasabb rendű talamikus magvaktól érkező messzire futó axonok.

A talamusz és a kéreg közötti kölcsönös kapcsolat két párhuzamos rendszerből áll. Az elsődleges talamusz magvakból vetítő VI. rétegi sejtek és a IV, VI. rétegbe érkező elsődleges talamusz bemenetek alkotják az egyik kört (erős szaggatott nyilak). A második kört a magasabb rendű talamusz magvak bezsinórozása alkotja. Ezek az V. réteg sejtjeitől kapnak bemenetet, cserébe a IV. réteg kivételével minden kérgi rétegbe küldenek bemenetet (halvány szaggatott nyilak). Az erős, kölcsönös talamusz -kéreg kapcsolat miatt a talamikus magvakat úgy is fel lehetne fogni, mint az agykéreg egyik rétegét. VII. rétegnek is szokták hívni, de a dolog abban hibádzik, hogy míg a kéreg rétegeiben a sejtek között vannak kapcsolatok, a talamikus serkentő sejtek nem kapcsolódnak egymáshoz.



Ígérem, most egyhamar nem lesz ilyen száraz, agyzsibbasztó leírás, de át kellett esni ezen, hogy mindenki méltányolni tudja mi is ketyeg a fejében. Ugye ehhez azt kell elképzelni, hogy az emberi agykéreg becslések szerint 200-250 kicsit eltérő modulból áll, mindegyikben sejtek . Azt hogy egy modulon belül hány oszlop van azt neház pontosan becsülni. Azt mondják egy oszlop átmérője 0,5 milliméter és 80-100 ezer sejtet tartalmaz. Ezek alapján a 2000 mm^2 méretű látókéregben 200-400 ezer kérgi oszlop lehet. Szóval agykérgünk kemény TPUval rendelkezik, lehet benne 200x300.000 = 60.000.000, azaz 60 millió bonyolult információfeldolgozó egység.

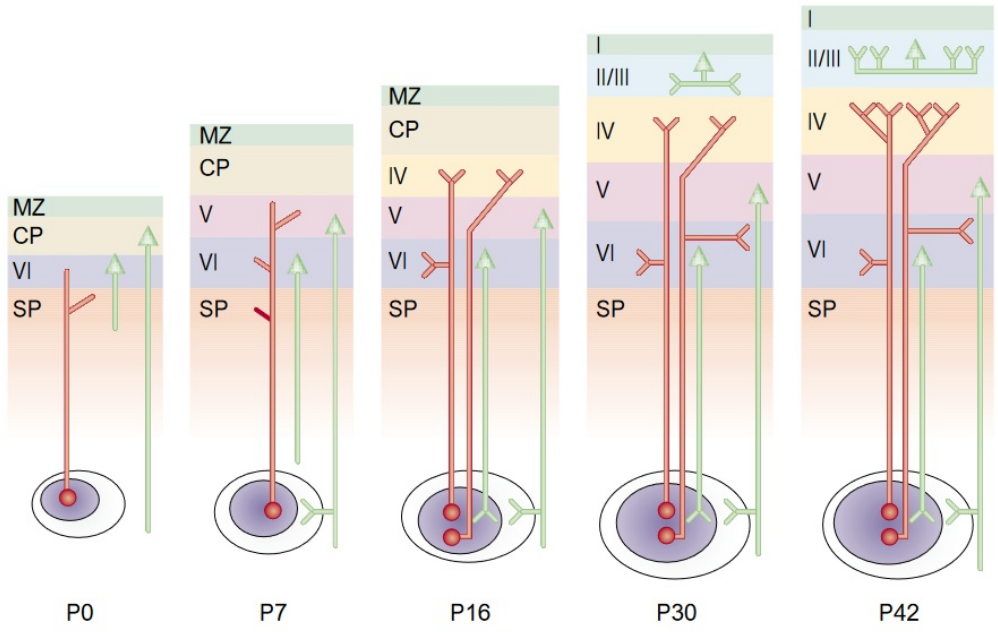
Az agykérgi oszlopokon belül és között áramló információk iránya. Ábramagyarázat a szövegben.

Szerző: **Gulyás Attila**

A kérgi mikroszerkezet evolúciós kontextusban: Hogyan fejlesszünk agykérget?

Az információ áramlás fent részletesett irányaiból, az ősibb kéregterületek (archikortex: hippokampusz) szerkezetéből és a kérgi rétegek everzióval való fejlődésének tényéből, ki lehet bogarászni hogyan bonyolódott az evolúció során az agykéreg. Itt megint egy figyelmeztetéssek kell hogy éljek: egy kicsit spekulatív rész következik, de ha ezt észben tartjuk a spekuláció megengedhető.

A kéregfejlődés első lépcsőjén, amikor az agykéreg még csak besegített az alulról jövő információ hatékonyabb, rugalmasabb, tanulásra jobban képes fedolgozásába, a szürke állomány egyetlen sejtréteg volt, mely alatt és felett a dendritek rétegei helyezkedtek el, ahova a bemenetek érkeztek, például a talamuszból. Így van ez most is, az ősi kéregre hajazó hippokampuszban is. Itt azonban már látszik nyoma, hogy az egyetlen rétegen belül vannak felső és alsó sejtek, ezek felelnek meg a modern agykéreg (neocortex) V. és VI. rétegének, felettük pedig a legfőbb, csak dendriteket tartalmazó bemeneti réteg helyezkedik el, mely az I. rétegnek felel meg. Az ősi kéreg megkapta az információt, majd egyszerű feldolgozás után visszaküldte az alacsonyabb területekre.
A kérgi feldolgozás finomodásaként az I. rétegnek megfelelő dendritikus rétegben megjelentek a tüskés csillagsejtek, melyek a beérkező információt tovább küldik a kimeneti rétegekbe. Így a korábbi fő bemeneti réteg szétvált és kialakult a neocortex (modern agykéreg) IV. és I. rétegének megfelelő két bemeneti réteg. Plusz megmaradt a VI. réteg alján a dendritikus bemeneti réteg.
Az újabb kérgi területek megjelenésével lehetett párhuzamos a tüskés csillagsejtek feletti kis piramissejtek megjelenése, melyek közelebbi és távolabbi agykérgi területekkel és egymással alkottak kapcsolatot. Ugye ők kezdtek el információt küldeni az újonnan megjelent, a feldolgozási hierarchiába újonnan beépült, majd magasabb szintűvé váló területek felé. Itt egy trükkös evolúciós újításnak (szerencsének) kellett létrejönnie (rögzülnije). Korábban a piramissejtek visszafele vetítettek, ezek az új sejtek pedig a feldolgozási láncban előre vetítenek. De hát az evolúció nagy számokkal és kifogyhatatlan szerencsével próbálkozik.



A menyét látókérgének fejlődése. A fázisok kb megfelelnek annak ahogy az evolúció során a kérgi feldolgozás bonyolódott. A P0 (születéskori állapot) megfelel az ősi 1 sejtréteg + 2 dendritikus rétegű állapotnak. P16 (születés után 16 nappal) felel meg a IV. réteg kialakulásának, a későbbiekben a II/III. réteg bezsinórozása történik.

Ha az everzió logikját követjük, akkor a mostani II. réteg apró, erős oszlopok közötti (inter-kolumnáris) kapcsolatokat alkotó piramissejtjeinek kellett legújabban beépülnie az I. rétegbe, ezáltal új réteget kiharcolva maguknak. Ugye az ő viszonyuk a III. réteg sejtjeihez olyan, mint a VI. rétegi sejteké az V. rétegiekhez, azaz erősebb közeli kapcsolatrendszerrel rendelkeznek, mint a III. rétegi sejtek. Szerepük hasonló lehet, mint a tüskés csillagsejteké, megrágják kicsit az információt mielőtt azt a III. réteg továbbküldi magasabb kéregterületek felé. És persze az új rétegek kilakulásával párhuzmosan előnyösnek bizonyult, hogy kölcsönhatások alakuljanak ki a II/III kérgi előrecsatoló és az V/VI visszacsatoló rétegek között, azaz a két rétegcsoport egymást is beidegzi.
Egyenlőre ennyi réteg van a neocortexben, bár gyanítom, hogy ha megérnek az emlősök vagy későbbi utódaik még néhány tíz millió évet újabb sejtrétegek épülnek majd be egyre nagyobb fejükbe.

Az agyi stabilitás keretei

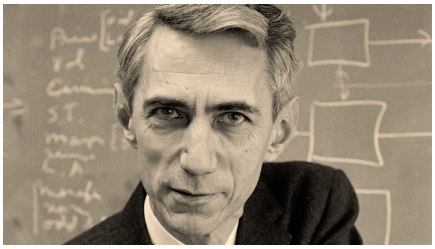
Eddig főleg a serkentő kapcsolatrendszerekről volt szó, hiszen a serkentő sejtek aktivitásmintázata kódolja az információt, kapcsolataikban tárolódik a memória. Egy kicsit meg kell világosítani miért van szükség gátlósejtekre, mi a szerepük.

Említettem fentebb, hogy egy csak serkentő elemekből álló, ráadásul erősen visszacsatolt rendszer egy igen veszélyes rendszer. Nehéz olyan aktivitási szintet beállítani, hogy az aktivitás a visszacsatolás hatására ne nőljön exponenciálisan a végtelenségig.

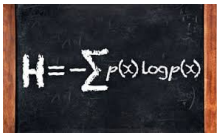
Ez ugye a hangtechnikában a gerjedés az agy esetében pedig az epilepsziás roham.
De nem csak a túlgerjedés veszélye miatt van szükség az agyi aktivitási szint keretek között tartására, hanem a kódolás, információfeldolgozás és asszociatív tanulás jó hatékonysága miatt is. De a másik végletre is igyázni kell, az erős csillapítás az aktivitás elhalásához vezet. Ezt sem akarjuk, mert ilyen a kómás agyban történik.



Claud Shannon a Bell laboratóriumban azt vizsgálta, egy hírvivő csatornán hogy lehet a legtöbb hasznos információt átvinni. Arra jutott, hogy akkor lehet a legtöbb információt átvinni egy csatornán, ha azon a lehetséges jelszintek hasonló arányban fordulnak elő. Nézzük meg ezt digitális esetre, amikor is lehet 0 vagy 1 a jelszint. Ez megfelel az agynak is, hiszen egy idegsejt lehet aktív vagy nem, az axonon fut jel vagy nem. Shannon azt mondta, hogy ha p a valószínűsége az aktív jelszintnek akkor az átvitt információt az



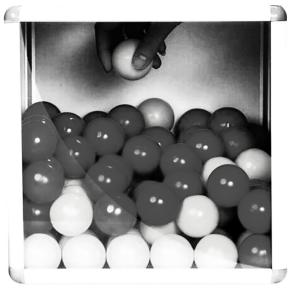
Claud Shannon. Meghatározó volt a számítógépek és a telekommunikáció elméletében. Mellesleg költő és remek zsonglőr is volt.



Az információtartalmat meghatározó egyenlet.

egyenlettel számolhatjuk ki. Márpedig ennek a függvénynek akkor a legmagasabb az értéke, ha p=0.5, azaz a csatornán átlagosan az idő felében magas a jelszint.

Ezt a kombinatorikában is használt dobozbó húzunk golyót modellel is szemléltethetjük. Vannak fekete és fehér golyóink. Ha beteszünk egy dobozba 10 golyót és megnézzük hányféleképpen rendezhetjük el az egymás után kihúzott golyókat, akkor könnyen belátható, hogy ha a dobozban csak 10 fekete, vagy csak 10 fehér golyó van, akkor csak egyféle mintát kaphatunk, csak egyszínű golyókból álló sorozatot. A lehetséges minták száma akkor lesz a lemagasabb, ha a golyók fele fekete, másik fele fehér.



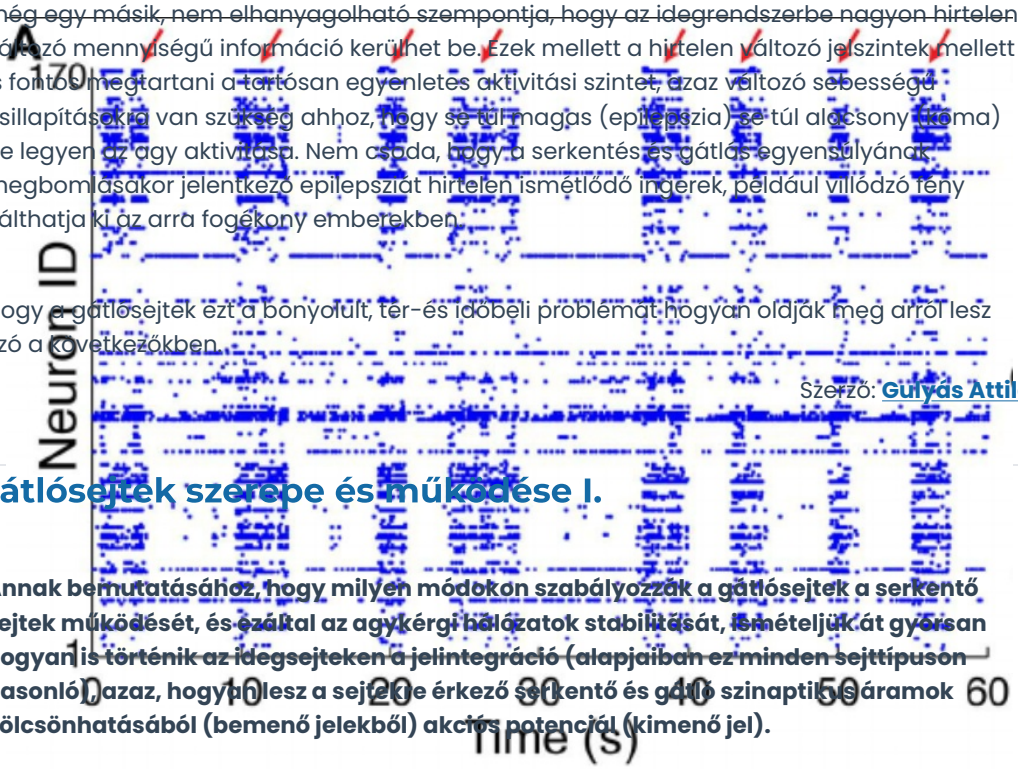
Fekete és fehér golyókat tartalmazó doboz.

Ha az mondjuk, hogy az idegsejtek mintázatában kódolódik az aktivitás, akkor abban az esetben lesz a lehetséges mintázatok száma a legnagyobb, ha egyszerre az idegsejtek fele aktív. E szerint a logika szerint tehát idegsejtjeink felének kellen egy adott pillanatan működnie.
De van itt egy másik szempont is. Az asszociatív mátrix memória részben bemutattuk azt, hogy egy hálózat akkor tudja a legtöbb mintázat párt összetanulni, asszociálni, ha az egyes mintázatokban egyszerre viszonylag kevés elem aktív. Azaz **p** egy kis számhoz tart.

Ha tehát egy optimálisan reprezentáló és ugyanakkor jól tanuló hálózatot akarunk készíteni, akkor az a jó, ha az egyszerre aktív sejtek aránya 0 és 0.5 között van. Legyen mondjuk 0.1, azaz egy időben az idegsejtek 1/10-e legyen aktív. Nos az agy is valahol e körül állapodott meg. Az elsődleges érző területeken ez inkább nagyobb (0.3, azaz 10 sejtből 3 aktív egy adott pillanatban), de a magasabbrendű asszociációs kérgekben viszont kisebb 0.05-0.001, azaz a kódolás nagyon ritka, esetenként sejtek 1/20-a 1/1000-ede sül csak ki.

Az epilepszia és a kóma között kell tehát az agynak megtalálnia a legtöbb információt kódoló és raktározó aktivitás szintet. De az aktivitási szint megfelelő szinten tartásának van

még egy másik, nem elhanyagolható szempontja, hogy az idegrendszerbe nagyon hirtelen változó mennyiségű információ kerülhet be. Ezek mellett a hirtelen változó jelszintek mellett is fontos megtartani a tartósan egyenletes aktivitási szintet, azaz változó sebességű csillapításokra van szükség ahhoz, hogy se túl magas (epilepszia) se túl alacsony (koma) ne legyen az agy aktivitása. Nem csoda, hogy a serkentés és gátlás egyensúlyának megbomlásakor jelentkező epilepsziát hirtelen ismétlődő ingerek, például villódzó fény válthatja ki az arra fogékony emberekben.



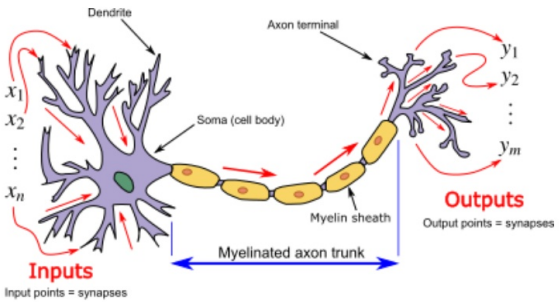
Hogy a gátlósejtek ezt a bonyolult, tér- és időbeli problémát hogyan oldják meg arról lesz szó a következőkben.

Szerző: Gulyás Attila

A gátlósejtek szerepe és működése I.

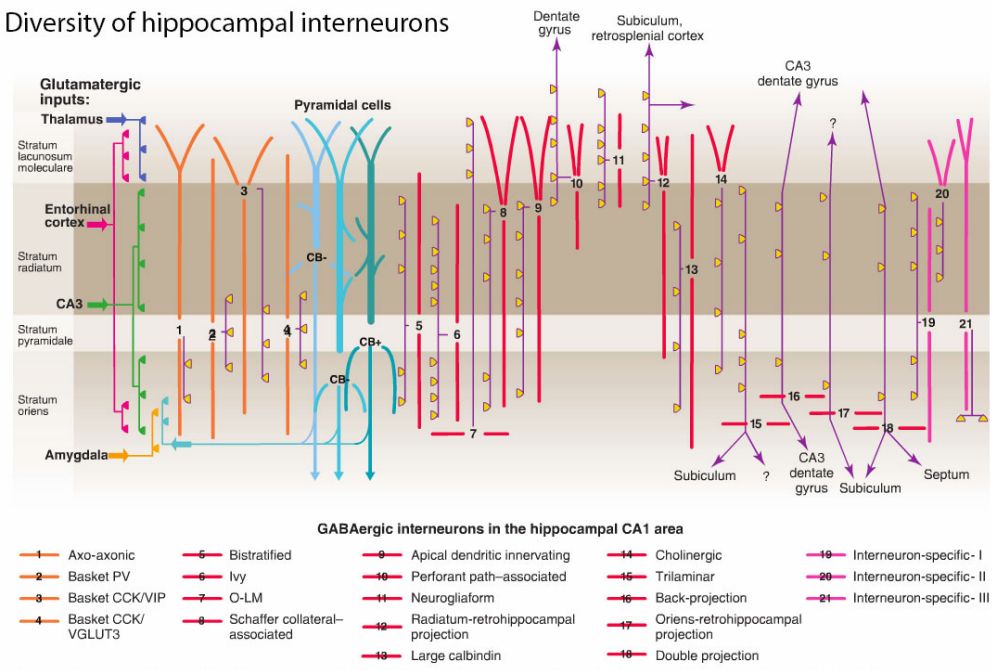
Annak bemutatásához, hogy milyen módokon szabályozzák a gátlósejtek a serkentő sejtek működését, és ezáltal az agykérgi hálózatok stabilitását, ismételjük át gyorsan hogyan is történik az idegsejteken a jelintegráció (alapjaiban ez minden sejttípuson hasonló), azaz, hogyan lesz a sejtekre érkező serkentő és gátló szinaptikus áramok kölcsönhatásából (bemenő jelekből) akciós potenciál (kimenő jel).

Sejtek tüzelési mintázata a hippokampus[illegible] aktív egyszerre, ez a terület egy ritkább[illegible] első [illegible] akkor lesz a leghangosabb (252) amikor a golyók fele fekete a.



Az információ áramlás iránya az idegsejteken. Lásd szöveg.

1) A serkentő axonok végtalpaiból felszabaduló glutamát megnyitja az AMPA és NMDA, a gátlókból felszabaduló GABA a GABAa ionotróp receptorokat.
2) a beáramló Na^+, illetve Cl^- ionok hatására EPSPk és IPSPk, azaz serkentő és gátló posztszinaptikus potenciálok alakulnak ki a sejteken, melyek helyben depolarizálják, pozitívabbá teszik vagy hiperpolarizálják, negatívabbá teszik a dendritek sejthártyáján eső membránpotenciált.
3) A különböző helyekről érkező áramok csillapodva végigterjednek a sejtek dendritfáján, miközben összegződnek. A gátló áramok részben kioltják a serkentő áramokat.
4) Az összegződött áramok által kiváltott potenciálok beterjednek a sejttestre és ha elérik az axondombon a tüzelési küszöböt, akkor akciós potenciál indul az axonon, ami eljut az összes végtalpba, hogy ott ingerületátvivő anyag felszabadulást váltson ki a célsejtekkel alkotott szinapszisokban, azaz jelet adjon át a következő sejtnek (akár 20 ezernek).



Az agykéreg egy ősi, egyszerűbb területén, a hippokampuszban található gátlósejt típusok denrit és axonfájának sematikus rajza. A dendritek határozzák meg milyen bemenetet kapnak a sejtek, az axonok pedig azt hogy a serkentő sejtek mely részeire ad gátlást az adott sejttípus.

Mint említettük a gátlósejtek anatómiailag és élettanilag változatos csapatot alkotnak. A gátlósejtek alakja, morfológiája, azaz, hogy hol helyezkednek el információgyűjtő dendritjeik, és hol gátlást kiváltó axonvégződéseik, két dolgot határoz meg: 1) honnan milyen és mennyi bemeneteket gyűjtenek be, azaz milyen hálózati eseményekre reagálnak és 2) az axonok a többi sejt mely részén végződnek, azaz a célsejtek jelintegrációjának mely szintjén csökkentik azok aktivitását.

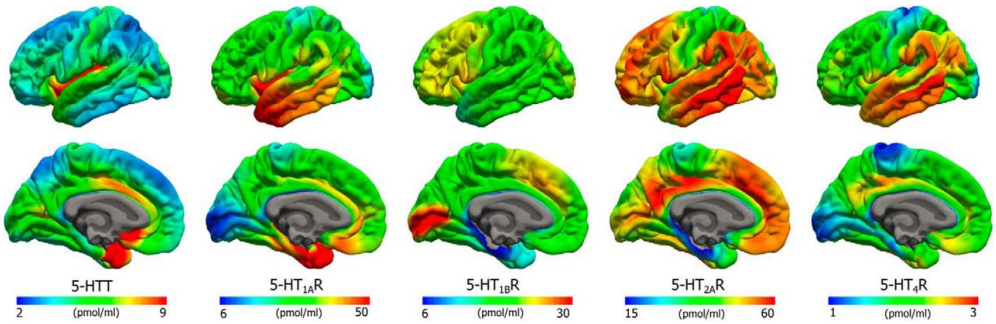
A változatos élettani tulajdonságok lehetővé teszik, hogy a gátlósejt típusok érzékeljék a beérkező jelsorozatok időbeli és térbeli szerkezetét.: bizonyos gátlósejtek csak akkor kapcsoljanak be, ha egyszerre sok bemenetet kapnak, más sejttípusok esetében elég, ha csak egy szélesebb időablakban érkezik be elegendő bemenet. Az aktiválódott sejtek vérmérsékletüknek (a genetikai program alapján, a hálózatban betöltött szerepüknek) megfelelően vagy sok akciós potenciált bocsájtanak ki vagy lassan, lustán szólalnak meg. Ilyen módon a gyors és a lassú aktivitás változásokat is kezelni tudják különböző időablakokban.



Hasonlóan a az agyi aktivitás szabályozásához, a tűzesetek megelőzésének is számos módja van.

A társadalomban és mindennapjainkban is vannak hasonló, eltérő szinteken működő, különböző sebességgel beavatkozó védekezési mechanizmusok. Ha felteszünk megsülni egy adag rántott húst, először is rövidtávon emlékszünk arra, hogy időben vegyük le és zárjuk el gázt, nehogy leégjen a lakás. A biztonság kedvéért az óvatosabbak lakásában van tűzjelző berendezés, amely szól, ha már kialakulóban a baj. Van, aki még poroltót is tart otthon, ha mégis baj van. És persze majdnem mindenkinek van lakásbiztosítása,

mely fedezi a tűzkárt. De társadalmi szinten is több szintje van a védelemnek. Szigorú szabályok szerint lehet egy gáztűzhelyt beszerelni, a tűzoltók megszabják, hogy hogyan kell egy lakásban ezeknek a dolgoknak elhelyezkednie, azért, hogy ne kelljen a legrosszabb esetnek bekövetkeznie, kivonulniuk a szerkocsival a már égő lakást oltani.



Az egyik moduláló ingerületátvivő anyag, a szerotonin eltérő hatású receptorainak eloszlása az agyban. Az egyes agykérgi területeken más hatást fejt ki a szerotonin a sejteken, ezáltal a moduláló anyagok, elsősorban a gátlósejteken keresztül szabályozzák melyik agyterület mikor és milyen működési módba kapcsoljon.

Az anatómiai és élettani tulajdonságaik mellet a gátlósejtek abban is igen változatosak, hogy milyen moduláló ingerületátvivő anyag érzékelésére alkalmas receptor mely fajtáit fejezik ki. Mivel a különböző stabilizáló feladatokat betöltő gátlósejtek más moduláló anyagokra érzékenyek, a felszabaduló moduláló anyagok arányának változására a gátlósejtek áthangolják működésüket és ezáltal az agykérgi hálózatok működése megváltozik. Erről hamarosan részletesebben is lesz szó. Az előbbi példát folytatva vannak ugye olyan időszakok amikor például tűzgyújtási tilalmat rendelnek el az állami szervek és készenlétbe helyezik a tűzoltókat. Nyáron szárazság és hőség idején van erre szükség, de télen nemigen. Hasonlórendszereket tart fent az állam járványok, viharok, árvizek megelőzésére.

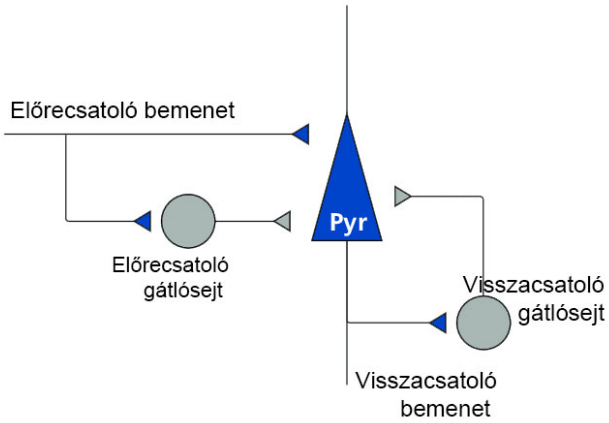
Szerző: **Gulyás Attila**

A gátlósejtek szerepe és működése II: Előrecsatolt és visszacsatolt gátlás

Túl egy nyári pihenésen és egy halott számítógépen és az ezt követő újra-telepítés gyötrelmein, folytatjuk az #agysétát, az agykérgi működés stabilitásának beállításába fontos gátlósejtek viselt dolgainak bemutatásával.

Az első funkcionálisan fontos szempont, ami szerint a gátlásokat csoportosítjuk, az, hogy honnan érkezik a gátlósejtektre a bemenet. Egy másik hálózatból vagy a helyi hálózatból, ezek szerint a gátlás lehet előrecsatolt vagy visszacsatolt. Az agyban nem minden területen van szükség kifinomult előre és visszacsatolt gátlásokra, ugyanis számos agyi területen (főleg a kéreg alatti területeken) csak előrecsatolt serkentő (esetleg gátló vagy moduláló) kapcsolatok vannak, hiányoznak a visszacsatolt serkentő körök, melyekben veszélyes szintre emelkedhetne az aktivitás. Emiatt, gátlás nélkül is megbízható ezen területek működése. Az agykéreg működéséhez azonban elengedhetetlenek a masszív serkentő-serkentő sejt kapcsolatrendszerek, hiszen ezekben a kapcsolatokban tárolódik a memória, és a körkörös kapcsolatok eredménye a feldolgozás, a gondolkodás.

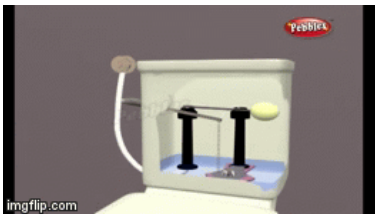
Az agykéregben tehát nagyon fontos a pontosan működő gátlás, ez látszik is abban, hogy az agykérgi idegsejtek 10-15%-a gátlósejt.
A címben megkülönböztetett kétfajta gátlás egyikével, a visszacsatolt gátlással mindenki



Az előre és visszacsatolt gátlást indító pályák diagramja. A Pyr-al jelölt serkentő piramissejten előre és visszacsatotl gátlást is közvetítő gátlósejtek fejtenek ki gátlást.

nyitja a kazán ajtaját és fokozza az égés sebességét, növekvő hőmérsékletre pedig zárja. Ez a rendszer annyival több mint a WC tartály, hogy egy tekerentyűvel beállíthatjuk az elérni kívánt hőmérsékletet. Azért hívják visszacsatolt gátlásnak, mert a rendszer állapota szabja meg, hogy a rendszerbe érkező bemenet mekkora legyen, azaz a kimenetet negatívan visszacsatolják a rendszerre.

naponta legalább egyszer találkozik, miután lehúzta a WC-t. A WC tartály, hacsak nincs baj, lehúzás után megtelik, de nem árad ki. Lehúzáskor, a tartályból kiáramló víz szintjének csökkenésére egy úszó lesüllyed, és kinyit egy szelepet. Ahogy emelkedik a vízszint, a szelep egyre jobban záródik, a víz áramlása a vízszinttel arányosan csökken, végül megáll. Ez egy egyszerű negatív visszacsatolás. Hasonló egy kazán levegőbeáramlását szabályozó szerkezet is, mely csökkenő vízhőmérsékletre



A visszacsatolt gátlás működése a WC tartály esetében. A kiürült tartályban emelkedő víz egy úszó segítségéve elzárja a víz beáramlását, amikor a víz eléri a megfelelő szintet.



Áradáskor feltöltenek egy víztárolót, ohgy később egyenletesen lehessen tartalmát használni. Ez is egy fajta előrecsatolt gátlás, a bemenő víz mennyiségével arányosan tesznek félre.

Előrecsatolt gátlással kicsit ritkábban találkozik az ember, talán azért, mert kicsit babrásabb beállítani, hogy jól működjön. Ugye itt arról van szó, hogy a rendszer bemenete határozza meg, hogy a rendszert mennyire csillapítsuk. Ide nehéz mindennapi példát találni, talán az egy jó hasonlat, hogy ha éppen sok pénzt keresünk (bemenet) akkor érdemes visszafogni költésünket (félretennünk belőle), hogy amikor majd szűkösebb idők jönnek, legyen tartalékunk, amiből meg tudunk élni. Így működik például egy vízierőmű vagy ez víztároló, ami sok eső esetén gyűjti a vizet, hogy majd később legyen miből turbinát hajtani vagy öntözni.

A csatolásoknál egy nagyon fontos elem annak erőssége és sebessége. A túl erős és túl gyors csatolások általában ronda rezonanciákhoz vezetnek, mint például a kezdő vezetők túlkormányzó cikkcakkolása, amikor a sáv egyik széle felé közeledve a másik irányba túlrántják a kormányt, majd a túloldalon az ellentétét teszik. A vezetői tanfolyamon szokták is mondani, hogy ahhoz, hogy egyenesen tudjunk menni messzire kell nézni és apró kormánymozdulatokat kell végezni, azaz lassú és finom legyen a visszacsatolás. Hasonlóan, kötélen való egyensúlyozás során erős oldal vagy fel-le irányú lengések alakulhatnak ki. Kitér a rendszer az egyik irányba, ezt ellensúlyozni akarjuk, de ha nem állítjuk meg az igazítást időben, és túlmegyünk az elvárt ponton, akkor a másik



Fontos a szabályozás sebessége és erőssége. Akkor tudjuk az úton egyenesen tartani az autót, ha egy távoli ontra célzunk és lassan reagálunk. A gátlósejtek is a hálózat átlag ativitását figyelik és különböző időablakokban reagélnak.

irányba követjük el a hibát. A megoldás itt is az, hogy valahova a távolba nézünk és ellazulunk, azaz a visszacsatolást gyengítsük, lassítjuk.

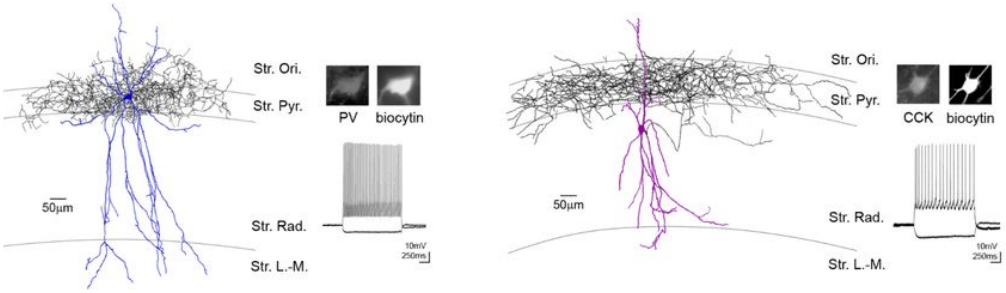
Az



Kötélen való egyensúlyozásnál is a távolba kell nézni és lassan reagálni.

agyban a gátlósejtek anatómiai (milyen jeleket fogadnak és adnak) és élettani (ezeket hogyan dolgozzák fel) tulajdonságaikat tekintve jóval változatosabb társaságot alkotnak, mint a serkentős sejtek. Vannak közöttük izgágák és vannak közöttük lassú, nyugodt, patópálok. A változatosság vezet az agy eltérő bemeneti szintek mellett is megjelenő stabilitásához. Egyes sejtek már alacsony hálózati aktivitás növekedés esetén gátolnak, mások csak magasabb szinteken. Mindkét csoportban vannak lassan és gyorsan reagáló sejtek. Együttes működésükből erősen ugráló bemeneti serkentés esetén is stabil, kiegyensúlyozott működés alakul ki.

Az agykéregben a visszacsatolt gátlás úgy működik, hogy a serkentő sejtek axonvégződéseinek egy része (10-15%-a) nem más serkentő sejteken, hanem a környezetben található gátlósejteken végződik, akik pedig gátlást adnak vissza a környezetükben lévő (gyakran ugyanazon) sejtekre. Amikor elkezd nőni a hálózati aktivitás, a gátlás bekapcsol és megállítja a növekedést. Remek eszköz ez annak beállítására, hogy a hálózati feldolgozás eredményeként a sejtek hányad része legyen aktív, azaz a kódolás mennyire legyen sűrű vagy ritka. Ha csavargatjuk a gátlósejtek küszöbértékét (mert azt is lehet, más gátlósejtek által), akkor meg tudjuk szabni, hogy milyen erős legyen a kimeneti szint.

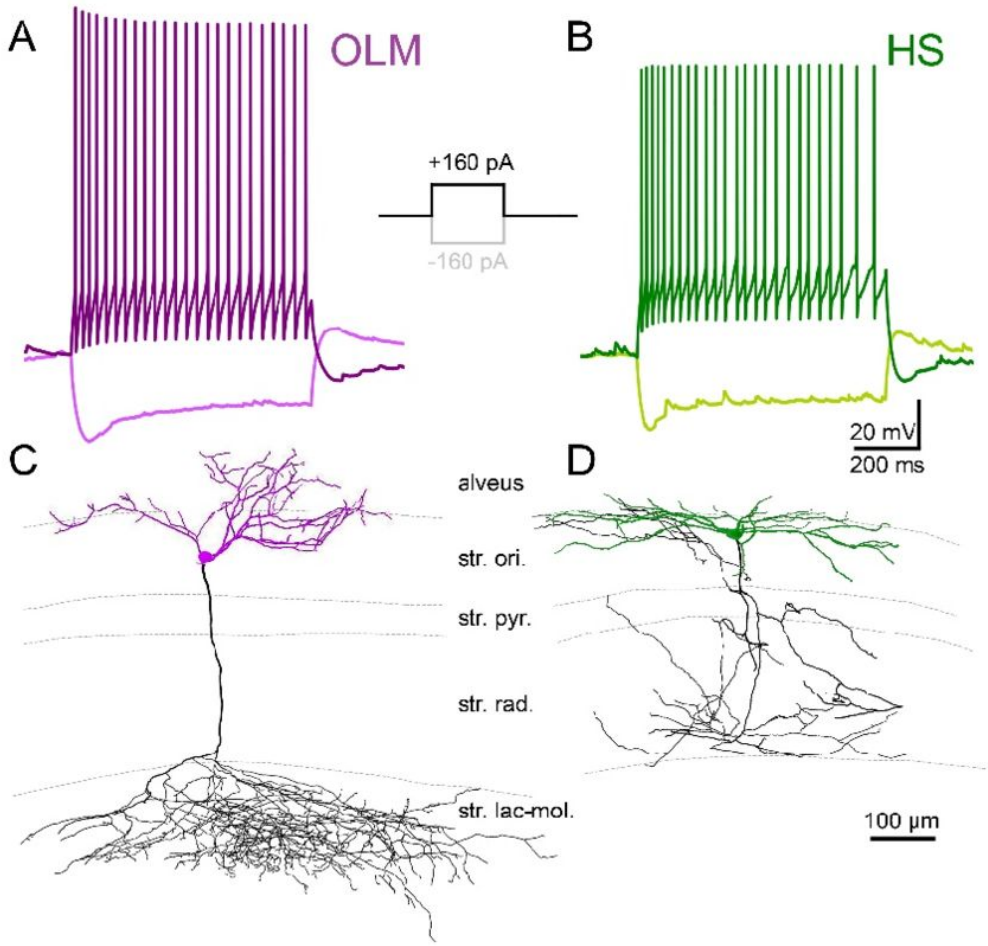


A hippkampuszban található speciális gátlósejtek, a kosársejtek, helyi serkentő sejtektől kapott bemenet alapján ugyanezen sejtek sejttestén fejtenek ki erős visszacsatolt gátlást. Ezeket a sejteket a külső bemenetek előrecsatolt módon is ingrelehetik. Dendritágak színesek, axonfelhő fekete. A sejtektől jobbra ingerlés hatására mutatott, eltérő aktivitásmintzatuk látszi. A baloldali sejt jóval több akciós potenciált generál, mint a 'lustább' jobbolali sejt.

Az idegrendszer a visszacsatolás sebességével is „játszik". Mint majd később látni fogjuk, a visszacsatolás megfelelő sebessége mellett aktivitás hullámzások is kialakulhatnak a sejteken, melynek hatására a sejtek működése összehangolódhat (szinkronizálódhat), ezzel

információ csomagokat állíthat elő a gátlás. Hasonlóan ahhoz, ahogy a színházakban kialakuló vastaps hangosabb, mint a szétszórt, a szinkron működő sejtek is hatékonyabban adják át az információt, mint az összerendezetlenül működők.

A neuronhálózatokban az előrecsatolt gátlás úgy működik, hogy vannak olyan gátlósejt csoportok, amelyeknek dendritjei egy-egy beérkező pálya rétegében futnak, begyűjtik a beérkező jeleket, majd ezek arányában gátolják a serkentő sejtekre érkező beérkező jeleket.



Két sejttípus (OLM, balra és HS jobbra) melynek denritjei a hippokampus oriens réteében helyezkednek el (magenta és zöld vonalak), az ide érkező bemenetek erősségének függvénylben gátolják (előre csetolt módon) a piramissejtekre érkező bemenetek hatékonyságát más rétegekben elhelyezkedő axonjaik útján (fekete vonalak). A sejtek fölött egy serkentő impulzus hatására kiváltott egy-egy akciós pontenciál sorozat látjató. A két sejt vsznylag hasonlóan reagél az ékező beenetre.

Ezen gátlásnak fontos szerepe van a bemeneti jelek hatékonyságának szabályozásában és a jelalakok finomításában, az időzítésben. Előrecsatolt gátlást már használtunk a mátrix memória esetében. A helyes mintázatelőhíváshoz szükség volt arra, hogy a bemeneti aktivitás mennyiségével arányos mennyiségű gátlás vágja le a nem megfelelő mértékben aktiválódó sejtek kimenetét, csak így lehetett pontos a memória előhívása.

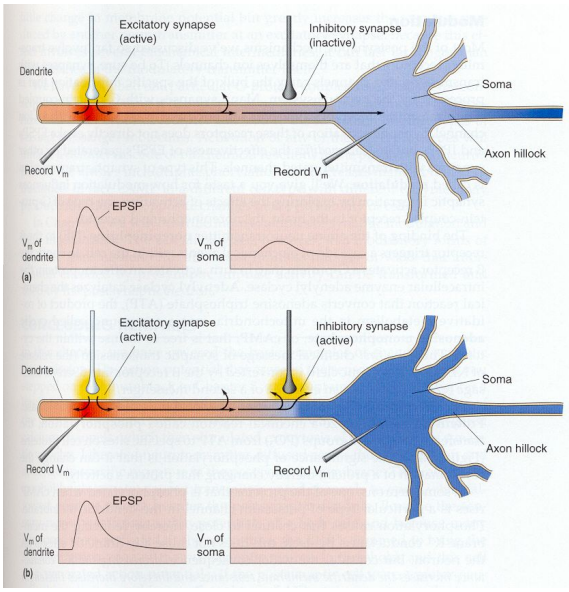
Vannak olyan gátlósejtek, amiket mind a bemeneti jelek, mind a helyi működés befolyásol, ezért mindkét típusú gátlásban részt vesznek. Több, eltérő információt hordozó serkentő bemenet esetén a két bemenet egymásra hatásának szabályozásában is részt vehetnek a gátlósejtek. Az egyik bemenethez kapcsolódó gátlósejt gátolhatja a másik bemenet

hatását, vagy fordítva így az eltérő helyről érkező, eltérő informciól kölcsonhatásba léphetnek.

Szerző: **Gulyás Attila**

A gátlósejtek szerepe és működése IIII: A dendriteken és sejttesten végződő gátlás hatásai

A gátlás másik változója, hogy a gátlósejt axonfelhője (az axon végtalpak és az általuk alkotott szinapszisok) a célsejtek (az esetek 90%-ban serkentő sejtek) mely részeit fedi le, azaz a jelintegráció melyik lépésébe szól bele a gátlás. Kezdjük a jeláramlás irányának elején, a dendriteken.



A gátlás hatása a dendritekre érkező serkentés terjedésében. A felső részen a dendritre érkező serkentés által kiváltott áram hatékonyan terjed be a sejttestre és vált ki választ. Az alsó rész azt mutatja, hogy a sejttesthez közelebb érkező gátlóbemeneten keresztül elszivárog a serkentő áram egy része és ezért nem tudja a sejttestet hatékonyan depolarizálni. A sejtek alatt a két helyen mért serkentő poszt szinaptikus potenciál látszik. Gátló esetben a sejtest közelébe nem jut el a jel.

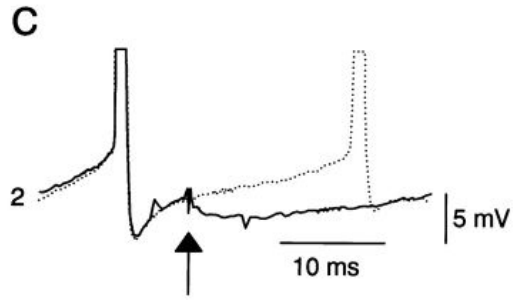
Amikor egy **dendritre gátlás** érkezik, akkor ott leggyakrabban az ionotróp GABAa receptorokat nyitja meg, melyek negatív Cl- ionokat engednek a sejtbe. Ezáltal csökkentik a helyi depolarizációt, a serkentést. A GABAa receptoron keresztül nagyon sok Cl- ion folyhat át, így a GABAa receptorokat felfoghatjuk úgy is mint a sejthártya ellenállását csökkentő csatornákat. Márpedig egy szivárgó membránon rosszul terjednek a jelek, azaz a dendritikus gátlás erősen csökkenti, hogy a dendritre érkező serkentő bemenetek milyen hatékonysággal jutnak le a sejttestre. Képzeljünk el egy kiluggatott locsolócsövet, nem sok víz jut el a célba. A



Egy lukas locsólócső rossz hatékonysággal vezeti s vizet.

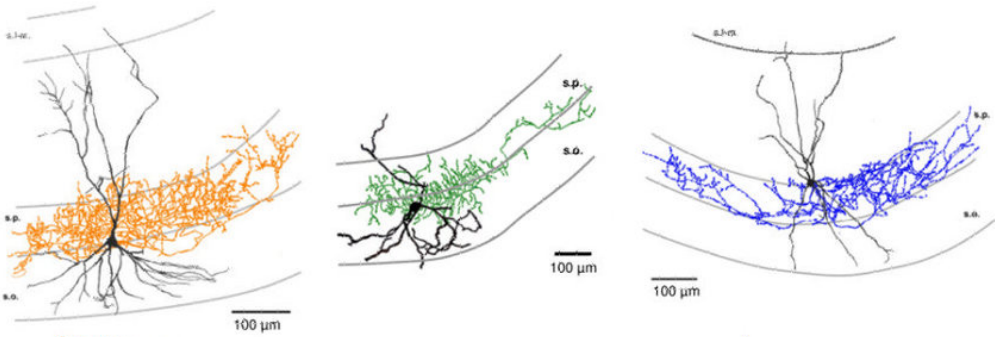
dendritikus gátlás tehát képes arra, hogy az egyes rétegbe eltérő helyekről érkező jelek hatását gyengítse, az eltérő információt hordozó bemenetek hatását megváltoztassa. Elérheti, hogy a sejt bizonyos dolgokra ne „figyeljen”.

Hasonló csillapító hatása van a **sejttestre érkező gátlás**nak is, de itt a gátlás nem a jel terjedését és összegződését befolyásolja, hanem azt, hogy a sejttesten a potenciál eléri-e a tüzelési küszöböt. Az itt elhelyezett gátlás bemeneti csatorna-függetlenül képes a sejt aktivitását csökkenteni vagy gátolni. Nem olyan kifinomultan szabályoz, lepisszegi a sejtet, de egy nagyon erős serkentés még kisütheti azt. A leghatékonyabb gátlást az axon eredésre érkező gátló bemenetek okozzák, melyek az axo-axoniku kandeláber sejtektől származnak. Ha ők működésbe lépnek akkor a sejtet igen nehéz kisütni. Hatásuk azonban csak olyan,



A sejttestre érkező gátlás képes megakadályozni az akciós potenciál kialakulását. Szaggatot vonal a sekentés hatására bekövetkező kettős akciós potenciált mutatja. Megfelelően időzített gátlás megakadlyozza a második akciós potenciál kialakulását (folyamatos vonal).

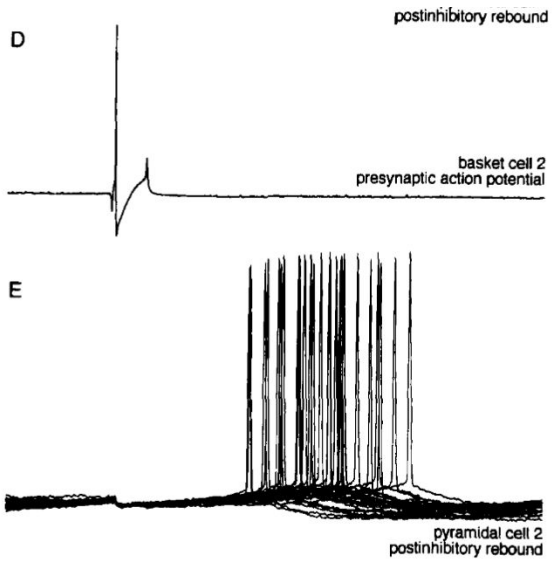
mint egy erős sejttestre érkező gátlás. A serkentő sejtekre érkező gátló bemenetek elsősorban a sejttest körül végződnek, azaz a gátlás erősebben figyel a kimenet szabályozására, mint arra, hogy a bemeneteket hogyan kell súlyozni. Ez érthető, hiszen az elsődleges elvárás a hálózat aktivitási szintjének stabilitása. A különböző irányokból érkező jelek súlyozása (a dendritekre érkező gátlás útján) már csak hab a jó működés tortáján.



A sejttest körül végződő gátlósejtek: job és balon ét kosrsejt rajza látható, középen az axon eredésnél végző axo-axonikus vagy kandeláer sejt. Az információ gyűjtő dendriteket feketa az axonfelhőt színes vonalak jelzik.

Van még két, nem teljesen magától értetődő hatása a sejttestre és a dendritekre érkező gátlásnak.

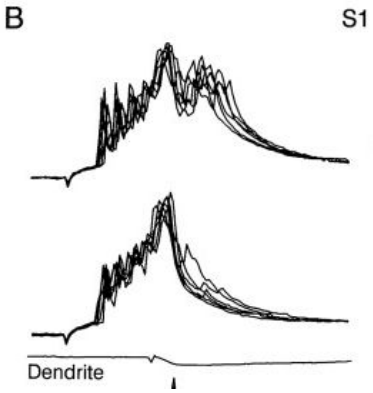
Az első, hogy **gátlással serkenteni és szinkronizálni is lehet.** Amikor egy sejtet, a sejttestre érkező gátlás egy időre hiperpolarizál, megakadályozza a sejtet abban, hogy tüzeljen, a sejten található Na+ és K+ csatornák olyan állapotba kerülnek, hogy amikor a gátlás elmúlik, akkor a sejt tüzelési küszöbe alacsonyabban van, mint a gátlás előtt, azaz a gátlás után a serkentő sejtek hajlamosabbak a tüzelésre. Amikor egy gátlósejt axonfelhőjében található serkentő sejtekről (több ezer) egyszerre múlik el a gátlás, több száz sejt szólalhat meg egyszerre, azaz szinkronizálódnak. Ez egy fontos információ tömörítést lehetővé tevő



Egy sejttestre gátlást adó kosársejtben kiváltott akciós potenciált (felső rész) követően az elvezetett piramis

mechanizmus. Egy dolog kódolásában résztvevő sejtek egyszerre szólalnak meg amikor elmúlik a gátlás. Hasonlóan ahhoz, mint amikor az óra végi kicsengetéskor kitör az osztályban a hangzavar, mert mindenki egyszerre akar beszélni a hosszú csendet igénylő óra után. Bár a példa abból a szempontból sántít, hogy ilyenkor nem túl jó az információ átvitele.

sejtekben megjelenik egy IPSP, majd ennek elmúltával a sejtek kisülnek (alsó rész). Mivel egy gátlósejt több száz serkentő sejtet idegez be, összehangolhatja azok működését.).



A felső ábrán egy serekentő sejt dendritből elvezetett áramok láthatók, melyeket elsősorban Ca beáramlás okoz. Az alsó ábra azt mutatja, hogy megfellelő időben megjelenő gátlás (alsó apró IPSP) lecsökkenti a Ca beáramlás mértékét és így a szinaptikus súlyváltozás esélyét.

A másik hatás a dendriteken jelenik meg. Ennek megértéséhez kicsit bele kell kukucskálnunk az idegsejteken folyó áramok haladó anyagába. Röviden. A dendritek amikor depolarizálódnak megnyílnak rajtuk Ca2+ csatornák is, és Ca2+-ot engednek a dendritbe. A belépő Ca2+-nak sok hatása van (erről hamarosan lesz szó), de ami számunkra itt fontos, hogy a szinaptikus súlymódosuláshoz, a memória kialakulásához a dendritekben megemelkedett Ca2+ szintre van szükség (lásd NMDA receptor és a Hebbi asszociatív tanulás bejegyzést). Amennyiben a dendritekre gátlás érkezik, ez megakadályozza a Ca2+ beáramlást és ennek hiányában a dendriteken nem következik be szinaptikus súly módosulása. A dendritekre érkező gátlás képes tehát a hálózatot egy információ feldolgozó, de nem tanuló állapotba kapcsolni.

Szerző: **Gulyás Attila**

A bonyolult neuron modell I

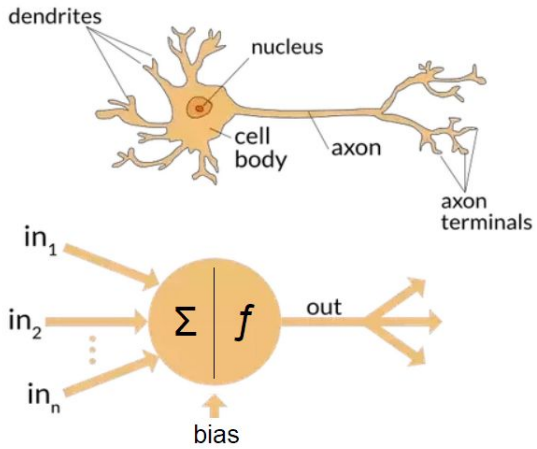
Rossz hírem van. Eljutottunk arra a szintre, ahol a továbbiakhoz a leegyszerűsített idegsejt modell már elégtelen. Egy valós idegsejt összetettsége úgy viszonyul az eddig bemutatottakhoz, mint egy bicikli egy önvezető autóhoz. Az alapelveket a bicikli szépen bemutatja; hogyan kell elindulni, kanyarodni megállni, azaz hasznos jószág, de nem tud egy családot messzire, gyorsan, magától elvinni. Aki fáradtnak érzi magát átugorhatja ezt a részt, nem feltétlenül szükséges, bár jól jön, a továbbiak megértéséhez.



A továbblépéshez többet kell elmondjak a sejteken folyó áramokról és hogy ezek hogyan vesznek részt a jelek integrálásában, a szinaptikus tanulásban, illetve a sejtek és a hálózatok működési módjainak kialakításában. A matematikailag leírt modell neuronnál bemutatott egyszerű egyenletnél jóval bonyolultabb, az egyes ionok mozgását közelítő egyenletrendszerek

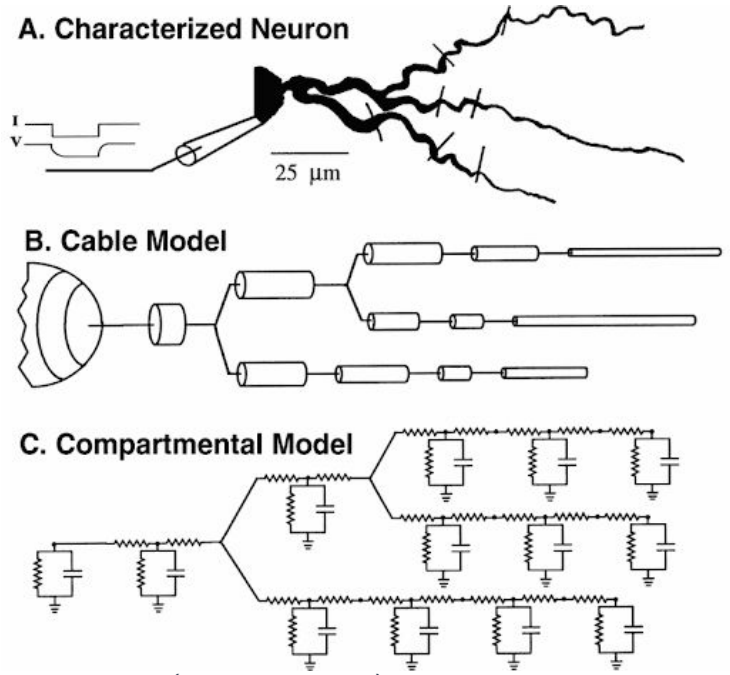
szükségesek a bonyolultabb sejtmodellekhez. Gyakorlatilag fel kell építeni egy idegsejtet darabokból,

A bicikli megy, megáll, kanyarodik, egyszerű, az önvezető autó elvisz minket ahova szeretnénk, de bonyolult.

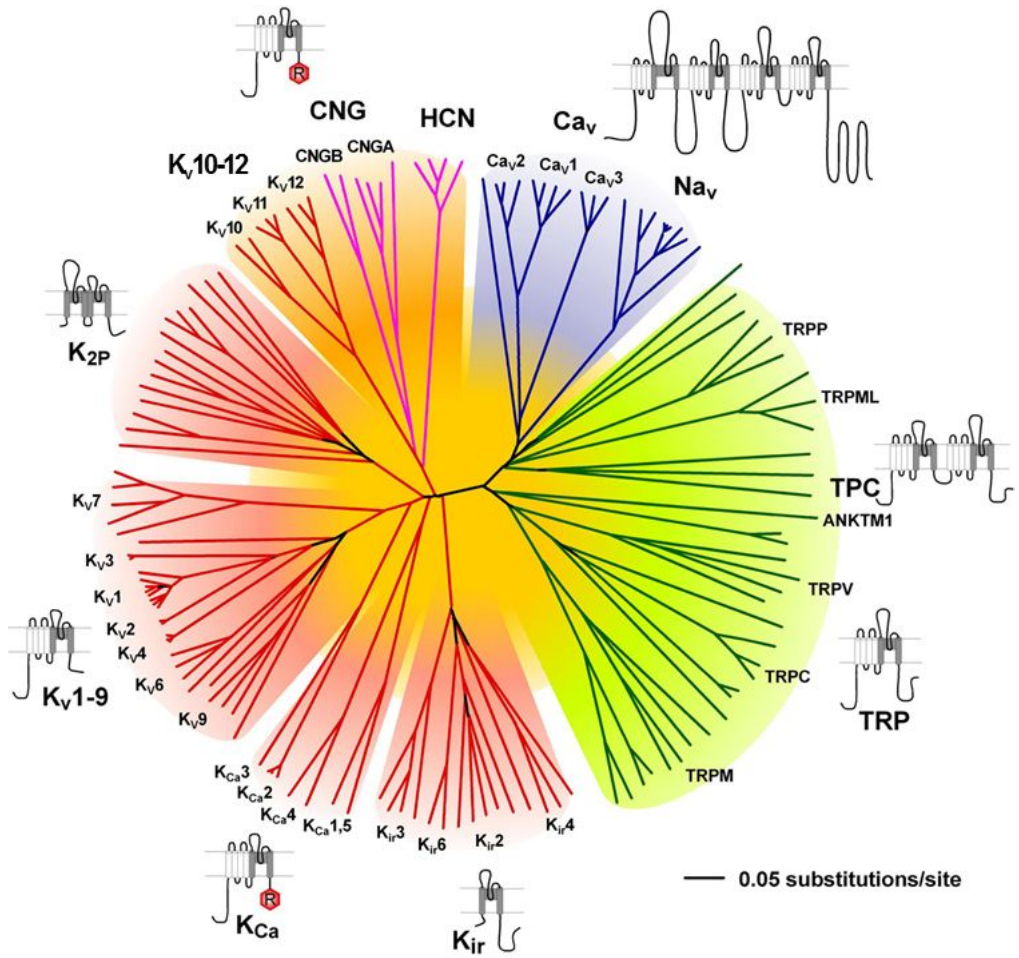


Az egyszerű, összead és tüzel (integrate and fire) idegsejtmodell egyetlen egyenlettel leírható, működése könnyen számolható.

dendrit szakaszokból és minden egyes darabra ki kell számítani az egyenletek alapján az ionok áramlását és az emiatt kialakult membrán potenciál értékeket. Ezt a megközelítést multicompartment model-nek, azaz sok rekeszes modellnek nevezik, mivel a sejt szerkezetét közelítő geometriában összekötött dobozokkal modellezik az ionok áramlását és a jelek terjedését. Az egyes dobozok mérete illeszkedik a dendritfa szakaszok és a sejttest méretéhez, és az adott sejtrésznek megfelelő típusú és mennyiségű ioncsatornát tartalmaz. Egy ilyen modell idegsejt jelintegrációjának számolása 103-105 -szer több számítási kapacitást igényel, mint egy egyszerű összead és tüzel (integrate and fire) modell esetében. Cserébe sokkal pontosabb leírását kapjuk egy idegsejt működésének, és persze jóval bonyolultabb információfeldolgozási képessége van egy ilyen modern neuronnak, mint a deep learning-ben használt egyszerű sejtmodelleknek (igaz azokból jóval több kezelhető). A mesterséges neuronhálózatok, melyek a jelenleg futó deep learning-et használó large language modelleket (LLM, nagy nyelvi modell) használják (ChatGPT és a többiek) sokban fejlődnének, ha ezeket a trükköket is használnák, de még nem tart itt fejlesztésük.



A sokrekeszes (multicompartment) idegsejt modellek esetében egy valós idegsejten mért 3D szerkezet és elektrofiziológiai paraméterek alapján (felső sor), megalkotják a megfelelő geometriában összekötött rekeszeket (kábel modell, középen), majd ezeken számolják az ionok áramlását és az ezáltal kiváltott áramokat és potenciálokat. Egy ilyen modell sejt futtatása sok számítást igényel, viszont szerencsére a feladat jó párhuzamosítható, a GPUk remekül megbirkóznak a feladattal.



Az ioncsatornák családfája. Narancssárga és pirossal a számtalan K csatorna, kékkel a Ca csatornák, zölddel pedig a többféle iont is átengedő TRP csatornák láthatók, melyek sok membránt érő ingerre reagálnak. Ilyenen hat például a capsaicin, az erőspaprika hatóanyaga.

Miben is bonyolultabbak a valódi idegsejtek?

1) A sejthártyájukban kifejeznek több tucat eltérő tulajdonságú feszültségfüggő Na+, K+ és Ca2+ csatornát, melyek ravasz módokon hatnak kölcsön és befolyásolják a jelterjedést a dendriteken, illetve az akciós potenciálok kialakulásának időbeli mintázatát.

2) Felszínükön számos metabotróp és ionotróp, moduláló transzmitterre érzékeny receptor található (a szokásos lista: acetil-kolin, szerotonin, dopamin, noradrenalin, hisztamin és még sokan mások). Ezen receptorok aktiválódásukkor számos (az előző pontban említett) ioncsatorna működését képesek hangolni, ezáltal átalakítani a sejtek membrán és emiatt jelintegráló tulajdonságait, illetve azt, hogy az axonterminálisból milyen hatékonysággal szabaduljon fel az ingerületátvivő anyag. Azaz képesek mind a jefeldolgozás, mind a hálózat kapcsolatrendszerének működését hangolni.

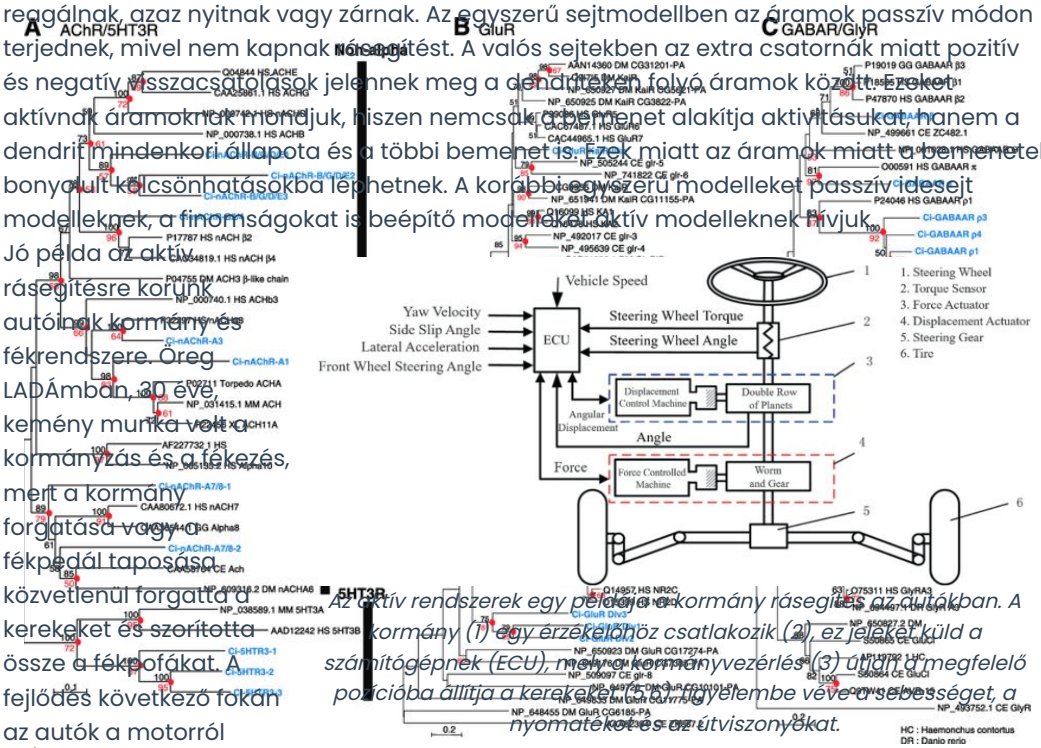
3) Az egyes sejttípusok szerkezete, geometriája, a dendritek elágazódása, vastagsága és a kifejezett ioncsatornák típusa és mennyisége sejttípusonként változó. Ezek egyedi jelintegrációs tulajdonságokkal ruházzák fel az eltérő sejttípusokat.

A bonyolult csatorna kölcsönhatásoknak és eltérő geometriának számos hatása van az idegsejtek jelfeldolgozására:

Először is jóval összetettebb, nem lineáris jelterjedésre és jelösszegződésre teszik alkalmassá a dendriteket, mivel találhatók rajtuk olyan ioncsatornák, amelyeket nem az átvivőanyagok nyitnak, hanem érzékelik a membránon eső feszültséget vagy más ionok koncentrációjára

reagálnak, azaz nyitnak vagy zárnak. Az egyszerű sejtmodellben az áramok passzív módon terjednek, mivel nem kapnak információt. A valós sejtekben az extra csatornák miatt pozitív és negatív visszacsatolások jelennek meg a dendriteken folyó áramok között. Ezeket aktívnak áramoknak nevezzük, hiszen nemcsak a bemenet alakítja aktivitásukat, hanem a dendrit mindenkori állapota és a többi bemenet is. Ezek miatt az áramok miatt a bemenetek bonyolult kölcsönhatásokba léphetnek. A korábbi egyszerű modelleket passzív idegsejt modelleknek, a finomságokat is beépítő modelleket aktív modelleknek hívjuk.

Jó példa az aktív rásegítésre korunk autóinak kormány és fékrendszere. Öreg LADÁmban 30 éve, kemény munka volt a kormányzás és a fékezés, mert a kormány forgatása vagy a fékpedál taposása közvetlenül forgatta a kerekeket és szorította össze a féktárcsákat. A fejlődés következő fokán az autók a motorról lecsippentett energia segítségével segítették a kerekek irányításában és a fékezésben. Manapság pedig már a kormány és a fékpedál nincs is közvetlenül összekapcsolva a kivitelező mechanikával, hanem érzékelők olvassák mit tekerünk, nyomunk és egy számítógép ad utasításokat a kerék és a fékrendszer megfelelő működtetésére. Ez a megoldás ráadásul adaptív, ha gyorsan megyünk, magasabb sebesség fokozatban vagyunk a kormány mozgatás sokkal finomabb, mint amikor tolatva parkolni próbálunk. A fékrendszerben is működésbe lép az ABS, ha jeges úton próbálunk fékezni. Ehhez hasonlóan adaptív, hogy az idegsejtek aktív jelintegrációja hogyan változik az eltérő feldolgozási állapotok függvényében.



Az aktív rendszerek egy példája a kormány rásegítés az autókban. A kormány (1) egy érzékelőhöz csatlakozik (2), ez jeleket küld a számítógépnek (ECU), mely a kormányvezérlés (3) útján a megfelelő pozícióba állítja a kereket (4), figyelembe véve a sebességet, a nyomatékot és az útviszonyokat.

Jelölő az aktivőanyag receptorok népes családfájából. Eltérő sejttípusok ezen receptorok más-más változatát használják és ezért egyedi módon modulálódik működésük.

Tovább is van. Mondom még, a következő bejegyzésben

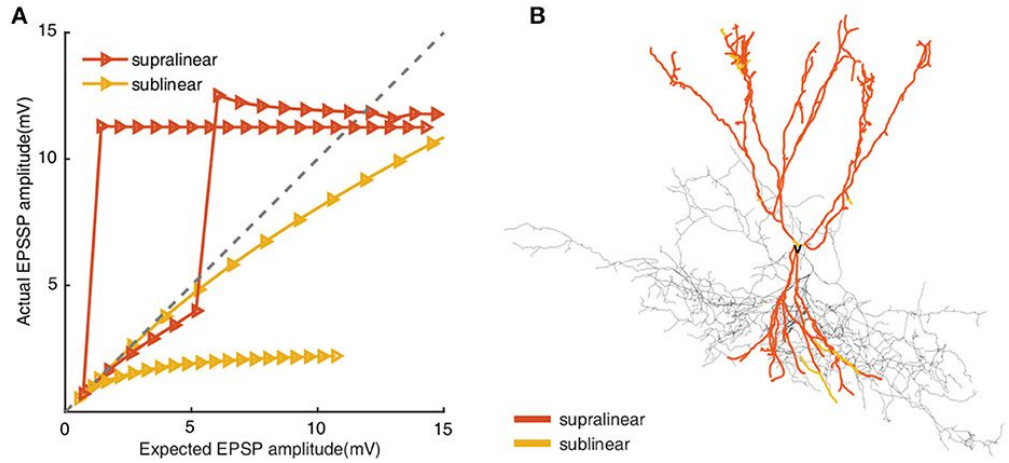
Szerző: **Gulyás Attila**

A bonyolult neuron modell II

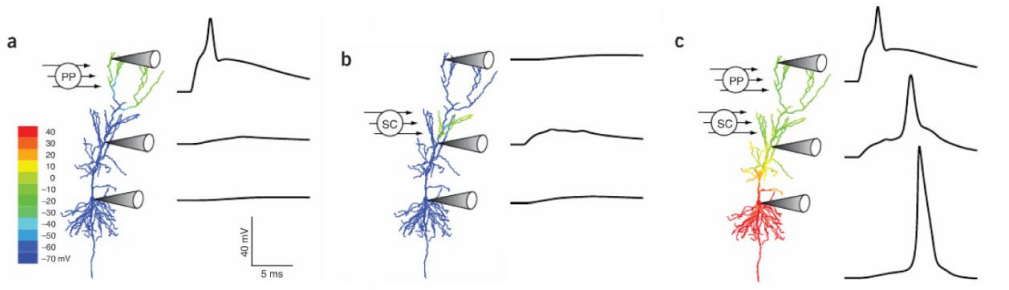
Az előző bejegyzésben bemutatott új szereplők, a további ioncsatornák, a jelterjedésre két ellentétes irányban hathatnak. Amennyiben a serkentés (depolarizáció) hatására további Ca2+ és Na+ csatornák nyílnak meg, akkor ezek felerősítik a serkentés hatását. A beérkező jelek a terjedés során felerősödnek, hatékonyabban aktiválják a sejtet.

Ha egyszerre két bemenetre érkezik serkentés, hatásuk az erősítés miatt nagyobb lesz, mint a két bemenet egyszerű összege, emiatt ezt supra-lineáris összegződésnek nevezik. Olyan is lehetséges, hogy a dendrit egyik részére érkező bemenet csak akkor jut tovább, amikor a sejttesthez közelebbi dendritrészen beindulnak ezek az erősítő rendszerek. Így az egyik agyterületről származó jel csak akkor tud beterjedni, ha egy másik agyterületről megfelelő pillanatban szintén érkezik információ. Ezt az információ kapuzásának nevezik, hiszen az egyik bemenet nyitja meg a kaput a másik számára.

Amennyiben a sejt membránpotenciálját hiperpolarizáló K+ csatornákat kapcsolnak be a



Egy idegsejtre érkező bemenetek az aktív áramok miatt kölcsönhatásba lépnek egymással és a vártnál erősebb (supralineáris) vagy gyengébb (sublineáris) összegzett jelet produkálnak. A bal oldali grafikon vízszintes tengelyén a bemenetek elvárt összege, függőleges tengelyén a valódi, mért összeg látható. Amikor a sejt a narancs görbével jelzett állapotban van gyengén sublineáris, azaz veszteséggel adódnak össze a jelek, amikor a piros görbével jelzett állapotban van erősen supralneáris. Egy bizonyos bemeneti erősség fölött a jelek összege hirtelen felerősödik.

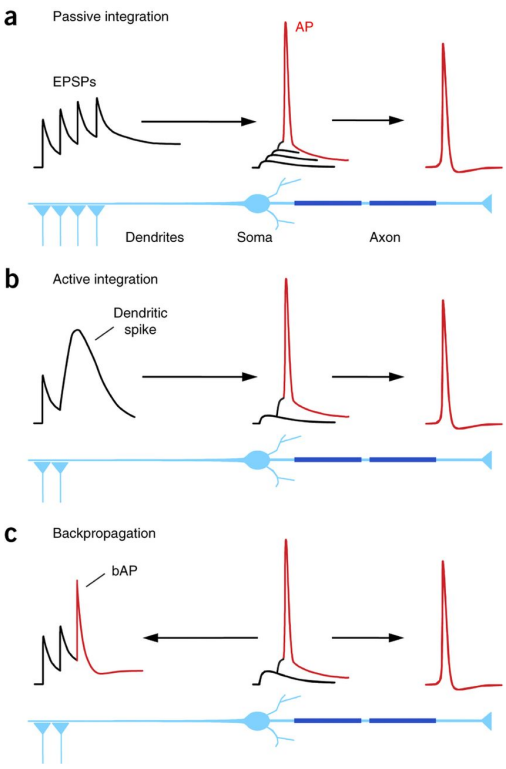


Egy másik aktív mechanizmus: a szinaptikus kapuzás. A bal oldalon a sejt csúcsi dendritjére érkező serkentő bemenetet által kiváltott válasz látható (felső görbe), a serkentés nem terjed hatékonyan a sejttest felé, ott alig vát ki választ (alsó görbe). Középen szintén egy egyedi serkentés érkezik, mely magában nem vált ki jelentős válaszzt se a sejttesten (alsó), se a távoli dendritben (felső görbe). Amennyiben a két bemenet megfelelő időzítésban érkezik (jobb oldalo oszlop) a két áram támogatja egymást és az erős szupralineáris összegződés miatt a sejttesten erős válasz jelnik meg. A közelebbi bemenet lehetővé teszi a távolabbi bemenet eljutását a sejttestre. A színek a sejtek egyes részeinek membránpotenciálját jelölik.

Ca2+ áramok vagy a membrán depolarizációja, akkor a beérkező serkentő bemenetek hatásának összege kisebb lesz, mint két bemenet összege a passzív esetben, ezért ezt sub-lineáris összegződésnek hívjuk.

Hogy a sejtek jelfeldolgozó tulajdonságai még kifinomultabbak legyenek, bizonyos sejtek esetében a dendriteken is ki tudnak alakulni akciós potenciálok (AP), melyek terjedhetnek a dendritágak felől a sejttest felé vagy a sejttestről a dendritek felé. A két irányú terjedésnek eltérő szerepe van az összetett jelintegrációban.
Amikor egy dendritágra elegendő mennyiségű serkentés érkezik ahhoz, hogy elérje a dendritikus akciós potenciál kialakulását, akkor a dendritről egy felerősített jel fut be a sejttestre. Ez lehet olyan erős is, hogy a sejtet is kisüsse. De az is előfordulhat, hogy több ilyen dendritikus akciós potenciálnak kell egyszerre beterjednie a sejtre ahhoz, hogy a sejt kisüljön. Mivel a dendritikus gátlás hatékonyan meg tudja vétózni egy dendriten az akciós potenciálok kialakulását, jelenléte vagy hiánya befolyásolja hogyan integrál egy sejt. A dendrit- és sejttest-gátlással, vagy a csatornák kapcsolgatásával, egyetlen idegsejt működhet úgy, hogy egyetlen dendritre érkező bemenet csoport kisütheti, de úgy is, hogy sok dendritágra sok bemenetnek kell egyszerre érkeznie ahhoz, hogy a sejt kisüljön. A sejt így

állapot függően lehet logikai VAGY vagy ÉS kapu.
A dendriteken kialakuló AP-k gyakran Ca2+ áramoktól erednek. Ugye a Ca2+ szint fontos a szinaptikus súly módosulásánál. Ha egy bemenet Ca2+ akciós potenciált vált ki egy sejtben akkor az egész dendritben megemelkedik a Ca2+ szint és a dendritre érkező összes aktivált szinapszis esetében beindul a szinaptikus súlyok megerősödése.



Passzív és aktív jelterjedési lehetőségek. Fent 4 egymás után érkező serkentő bemenet egyszerűen összeadódik, Így indul egy akciós potenciál, mely a sejttestről az axonra terjed. A középső esetben a dendriten (bal oldal) egy dendritikus akciós potenciál indul, mely a sejttesten klasszikus akciós potneciált vált ki (középen), mely az axonra is kiterjed (jobb). Az alsó esetben egy dendritről érkező serkentés akciós potenciált váltott ki a sejttesten, mely mind a dendritfára (bal) mind az axonra kiterjed (jobb).

Amennyiben a serkentő bemenetek dendritikus AP-t nem váltanak ki, de a sejttesten indítanak AP-t, akkor bizonyos sejttípusokban az AP a dendritekre is visszaterjedhet. Ennek itt megint abban van szerepe, hogy a szinapszisok számára a bekövetkező Ca2+ szint emelkedés jelezze, itt az idő tanulni, hacsak, egy jól elhelyezett gátlás ki nem kapcsolja ezt a visszaterjedő jelet. Az már csak extra csavar, hogy néha az egy vagy több dendritből beterjedő akciós potenciál visszapattan és a fenti módon visszaterjed az összes dendritbe.

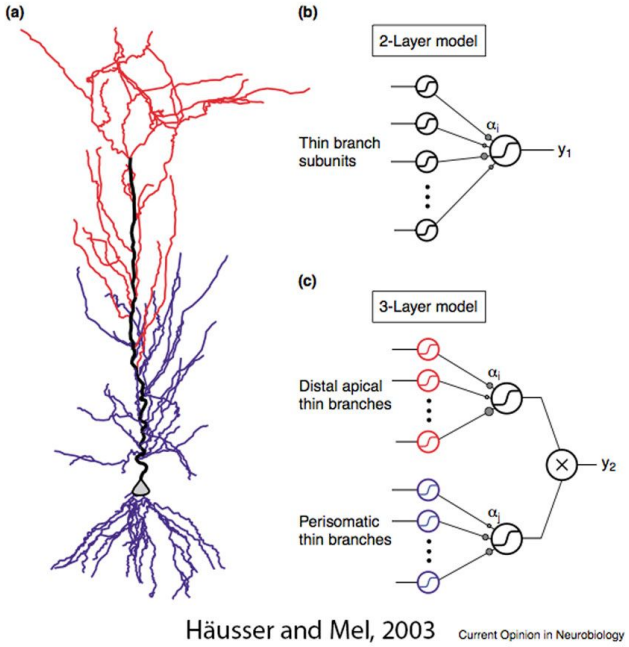
Végezetül léteznek olyan, elsősorban K+ áramok is, melyek lassabban vagy gyorsabban a nyugalmi potenciál irányába igyekeznek húzni a sejtet, vagy akár ez alá húzzák azt. Ha ezek az áramok gyorsak, képesek a dendritekre érkező EPSPket megrövidíteni, ezzel pontosabbá tehetik a jelátvitelt. Lassabb K+ csatornák pedig a sejtek tüzelési küszöbének beállításában fontosak. Ez utóbbiak a rövidtávú memóriában is szerepet játszhatnak, azáltal, hogy a sejtre érkező bemenetek egy időre megváltoztatják a sejt tüzelési küszöbét, és ezek után egy ideig egyes sejtek könnyebben vagy nehezebben tudnak kisülni. Ez a mechanizmus a rövidtávú memóriában játszhat szerepet, egy információt hordozó mintázat sejtjei, aktiválódásuk után egy ideig könnyebben kapcsolnak be, a mintázat rövid ideig fennmarad.

Összefoglalva: a valós, bonyolult idegsejtekben számos olyan ioncsatorna van még jelen, amelyektől a sejtek membránjai aktívvá válnak, mely a jelek jobb vagy rosszabb hatékonyságú összegződését és terjedését eredményezi. A csatornák működésének hangolásával a sejt bemenetei között összetett kölcsönhatások alakulhatnak ki, illetve a szinaptikus tanulás hatékonysága is változhat.

A legfontosabb hatás azonban az, hogy míg az egyszerű idesejt modellekben egy lépcsőben összegződnek a bemenetek és ha ez eléri a küszöböt akkor AP, kimenet keletkezik. Addig a valós, bonyolult idegsejtekben -elsősorban az agykérgi serkentő sejtekben, a piramis sejtekben- többlépcsős jelösszegződés figyelhető meg. Az első lépcsőben, ha megfelelő mennyiségű bemenet érkezik a távoli, vékonyabb, aktív dendritekre, akkor kialakulhat rajtuk dendritikus AP, mely a csúcsi dendrit segítségével a sejttestre terjed. Itt minden egyes dendritág tekinthető úgy, mint egy korábbi egyszerű, passzív idegsejt. A második lépcsőben pedig az egyes dendritágakról beérkező dendritikus AP-k összegződnek és ha elérik a sejttest tüzelési küszöbét, a sejt kisül. De az is lehet, hogy dendritcsoportok

összegződnek csak a második lépcsőben és ezen csoportok eredménye újra összegződik egy harmadik lépésben. A dendritek és a sejttest gátlásával a lépcsők küszöbe állítható, és így elérhető az is, hogy nagyon kevés bemenet kisüssön egy sejtet, de az is, hogy nagyon sok bemenet kelljen ehhez. A visszaterjedő AP-k szabályozásával pedig az előzőektől valamelyest függetlenül kapcsolható a memória kialakulásában szerepet játszó dendritikus Ca2+ szint emelkedés.

Azt, hogy minek a hatására kapcsolódnak a csatornák és a gátlósejtek eltérő információfeldolgozást okozó állapotba a következő bejegyzés szól.



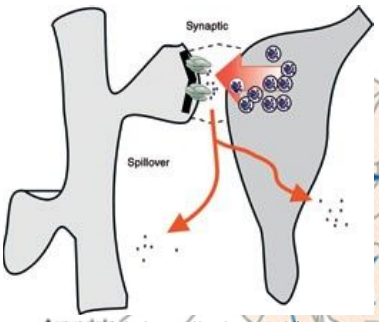
A két és három lépcsős nemlineáris jelösszegződés modellje agykérgi piramis sejtekben. Egy-egy dendritágban is kialakulhatnak dendritikus akciós potenciálok, amennyiben elegendő a serkentés, ezek aztán kölcsönhatnak a sejttesten, vagy más dendritágakkal és így 2 vagy 3 lépcsőben alakul ki a sejt kimenete.

Szerző: **Gulyás Attila**

A gátlósejtek és a hálózatok aktivitásának modulálása

Aki átugrotta az előző bejegyzést, melyben alaposan cikornyáztuk az idegsejtek jelfeldolgozását annak legyen annyi elég, hogy a sejthártyában, az alapvető jeltovábbító és jelintegráló feladatokat ellátó alap Na+, K+, Cl- és Ca2+ csatornákon kívül számtalan, sejttípusokra jellemző, finomabb működést lehetővé tevő csatorna található, melyeket különböző állapotokba kapcsolva megváltoznak a sejtek jelfeldolgozó tulajdonságai és ezáltal a sejtekből alkotott hálózatok számos feldolgozási módba kapcsolhatnak.

Az elmúlt évtized legfontosabb felismerése az volt, hogy az agyterületek megfelelő kölcsönhatásához az egyes területeket pontos időzítéssel kell a megfelelő működési állapotba kapcsolni. Az agy felépítésének bemutatásánál az agyat evolúciós története és felépítése alapján agykéregre és kéreg alatti területekre vágtuk. A kéreg alatti területekről felszálló moduláló (hangoló) pályák alapvető szerepet játszanak az agykérgi területek működésének hangolásában és összehangolásában, az állat viselkedési állapotának függvényében. A kéreg alatti területek a szervezet belső állapotáról, az állat motivációjáró, érzelmi állapotáról gyűjtenek információt, és ennek megfelelően kapcsolják az agykérgi területeket hatékonyan együttműködő feldolgozási állapotokba.
A felszálló szerotonint, hisztamint, dopamint, noradrenalint, acetil-kolint és GABAt felszabadító pályák változatos módokon hatnak az agykéreg serkentő és gátló sejtjeire. A pályakövető és mikroszkópos vizsgálatok megállapították, hogy ezekből a rendszerekből az átvivőanyagok felszabadulhatnak szinapszisok nélkül, nem célzottan, a sejtek közötti térbe,

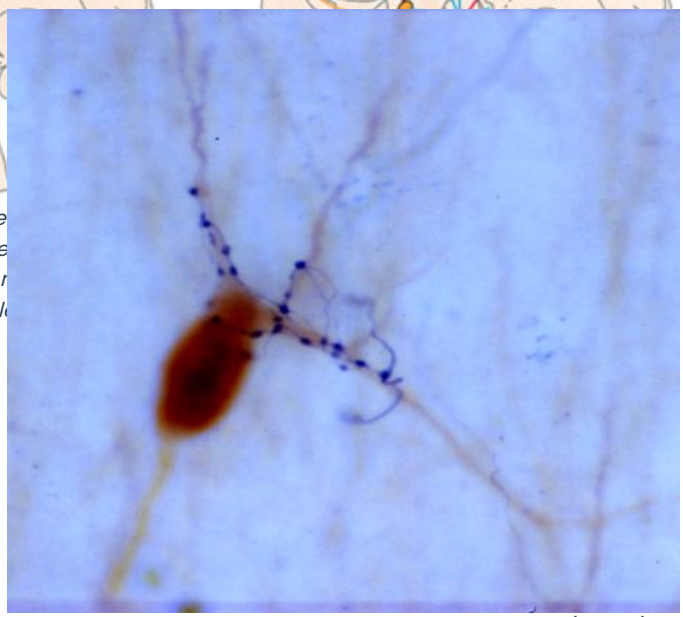


A jobb oldalon elhelyezedő axon végződésből felszabaduló átvivőanyag hathat szinaptikusan egy adott célsejtre vagy elszivároghat a sejtek közé és közvetve, lassan hathat a sejtek működésére.

lassan hatva a sejtekre. De célzottan is felszabadulhatnak szinapszisok útján, eltérő típusú sejtekre hatva, jelentősen gyorsabban. A vizsgálatok szerint számos rendszer kiválogatja magának a gátlósejteket, azokon belül is különböző típusú gátlásokat létrehozó alcsoportjaikat és ezek működésének modulációja útján képes igen hatékonyan a serkentő sejtek jelintegrációját befolyásolni.

A serkentő sejtek jelfeldolgozását a moduláló rendszerek tehát két úton befolyásolják. Egyrészt szinaptikus vagy nem szinaptikus módon a serkentő sejtek felszínén elhelyezkedő ionotróp és metabotróp receptorokra hatva megváltoztatják bizonyos ioncsatornák működését és ezáltal a sejtek jelintegrációs tulajdonságait. Másrészt eltérő gátlósejt csoportokat megcélozva, hasonlóan módosítják azok jelintegrációját, melynek eredményeként megváltozik a serkentő sejtekre érkező gátlás. A két hatás befolyásolja a jelek összegzését, a szinaptikus súly megváltozását vagy a sejt küszöbének rövidebb-hosszabb idejű megváltozását.

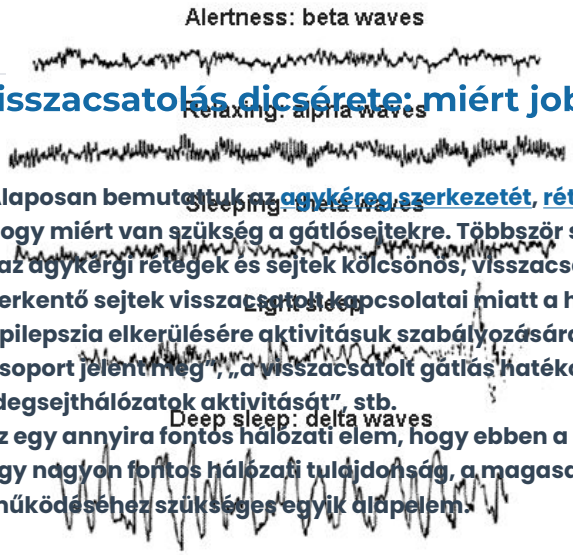
Intézetünk kutatói, köztük jómagam eredményei szerint például a mediális szeptumból eredő GABA tartalmú rostok válogatás nélkül az összes agykérgi gátlósejt csoport aktivitását csökkentik, ezzel közvetve növelik az serkentő sejtek aktivitását. Ez a pályarendszer lehet abban, hogy amikor az állat felderíti a környezetét, a hippokampusz nevű agyterület felváltva tudjon tervező és információ gyűjtő állapotok között átkapcsolni. Míg egy másik, a szintén általunk vizsgált, szerotonint tartalmazó mediális raphe mag idegsejtjeiből induló pályarendszer az agykéregben csak a dendriteket beidegző gátlósejteken végződik, és feltételezhetőleg a sejtek tanulási rendszerét kapcsolja be vagy ki, a megfelelő magatartási állapotban, amikor tanulásra van szükség.



A mediális szeptumból eredő GABA tartalmúrostok (fekete) körbefonják a hippokampuszban a kosársejteket (barna), ezáltal hatékonyan modulálják azok működését és közetve a serkentő sejtek nagy csoportjainak aktivitását.

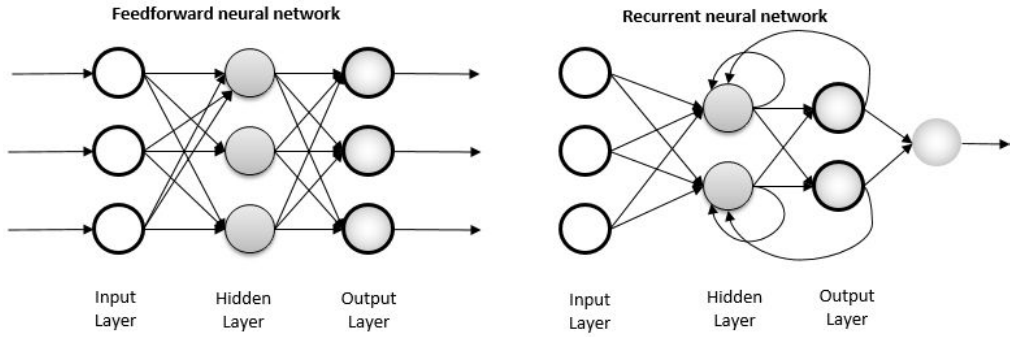
Ezek a gátlósejteken keresztül történő hangoló hatások felelősek azért, hogy az agykéreg egyes területei finoman összehangolt időzítéssel különböző EEG hullámokat mutató aktivitási módok között kapcsolgassanak. A figyelemhez társuló gamma, a pihenés alatt megjelenő alfa vagy az alvásra jellemző delta, theta aktivitások mindegyikében más moduláló ingerületátvivő közegben úszik az agy, amelyek hatására a serkentő és gátlósejtek jelintegrációs tulajdonságai az adott feladat elvégzésére alkalmas állapotba kerülnek.

Szerző: **Gulyás Attila**



A visszacsatolás dicsérete: miért jobbak a visszacsatolt hálózatok?

Alaposan bemutattuk az agykéreg szerkezetét, rétegeit, információ áramlását, illetve, hogy miért van szükség a gátlósejtekre. Többször szerepelt a visszacsatolás kifejezés: „az agykérgi rétegek és sejtek kölcsönös, visszacsatolt kapcsolatokat alkotnak", „a serkentő sejtek visszacsatolt kapcsolatai miatt a hálózatok túlaktiválódhatnak és az epilepszia elkerülésére aktivitásuk szabályozására az agykéregben számos gátlósejt csoport jelentmeg ", „a visszacsatolt gátlás hatékonyan tartja szinten az idegsejthálózatok aktivitását", stb.
Ez egy annyira fontos hálózati elem, hogy ebben a bejegyzésben alaposan körüljárjuk. Egy nagyon fontos hálózati tulajdonság, a magasabb rendű idegrendszerek működéséhez szükséges egyik alapelem.



Balra egy egyszerű előrecsatolt hálózat: a bemeneti és a kimeneti réteg között egy rejtett réteg található, de minden szint csak előrecsatolt kapcsolatokkal kapcsolódik a következőhöz. Jobboldalt egy igen egyszerű, visszacsatolásokat is tartalmazó hálózat látható. Ennek a példának is 3 rétege van, de a rejtett rétegen belül és a kimeneti rétegből a rejtett rétegbe visszacsatolt kapcsolatok is vannak.

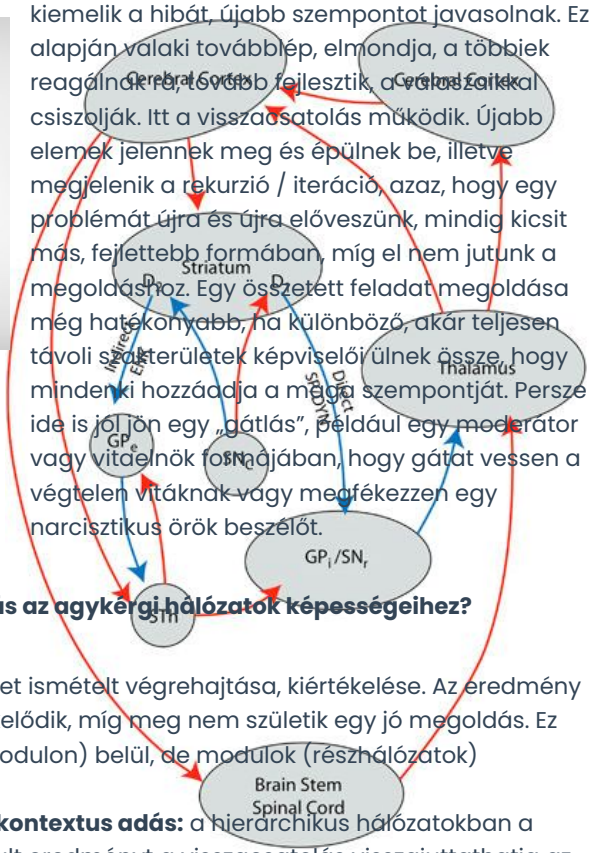
A visszacsatolás, rekurrencia, azt jelenti, hogy a hálózatban körkörös kapcsolatok vannak. Az alapoknál csak előrecsatolt hálózatokról beszéltünk. Itt beérkezik az információ, majd egymás utáni sejtrétegeken keresztül átkapcsolva kilép a hálózatból. A visszacsatolt hálózatokban, mint amilyen például az agykéreg, rétegeken belüli és rétegek közötti oda-vissza kapcsolatokat is látunk. A sejtek vagy sejtek csoportjai nem csak tovább vetítenek más hálózatok felé, hanem az aktuális hálózaton belül is létesítenek (visszacsatolt, serkentő) kapcsolatokat. A következő szinten, a hamarosan terítékre kerülő hierarchikus hálózatokba kapcsolt agykérgi területek esetében is megjelenik majd a visszacsatolás, a hálózatok kapcsolódnak körkörösen vagy kölcsönösen.

A gátlósejtek szerepénél írtuk, hogy azért nagyon fontosak, mert megvédik a rendszert a serkentő sejtek pozitív visszacsatolása miatt kialakuló túlzott serkentéstől, az epilepsziától. Nyilván fontos lehet a visszacsatolás, ha ekkora rizikót vállal az agykéreg miatta. Az bizony, roppant fontos. Az összetett működéshez szükséges több információ feldolgozási elemet valósít meg.
A visszacsatolás fontosságát talán legjobban az emberi döntéshozatallal lehet szemléltetni. Egy bonyolult feladatot megpróbálhatunk megoldani magunkban is. Elmélkedünk rajta egy ideig, majd előállunk egy megoldással. Ez azonban nem biztos, hogy a legjobb lesz, mert nem feltétlenül veszünk figyelembe minden szempontot vagy nem találjuk meg a legjobb megoldást, megragadunk egy félmegoldásnál. Nem véletlen, hogy bonyolult feladatokat az emberek megbeszélnek egymással. Valaki mond egy dolgot, erre reagálnak a többiek,



Egy kerekasztal megbeszélésen mindenkinek az ötletét megvitatják, továbbfejlesztik. Jól működik a visszacsatolás.

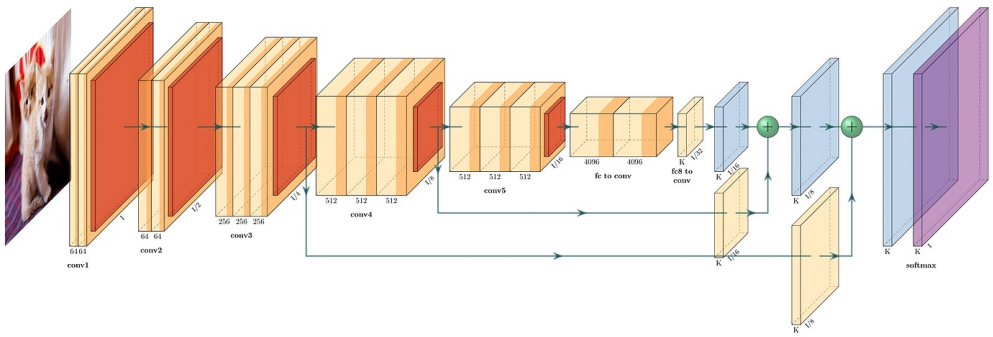
kiemelik a hibát, újabb szempontot javasolnak. Ez alapján valaki továbblép, elmondja, a többiek reagálnak rá, tovább fejlesztik, a válaszaikkal csiszolják. Itt a visszacsatolás működik. Újabb elemek jelennek meg és épülnek be, illetve megjelenik a rekurzió / iteráció, azaz, hogy egy problémát újra és újra előveszünk, mindig kicsit más, fejlettebb formában, míg el nem jutunk a megoldáshoz. Egy összetett feladat megoldása még hatékonyabb, ha különböző, akár teljesen távoli szakterületek képviselői ülnek össze, hogy mindenki hozzáadja a maga szempontját. Persze ide is jól jön egy „gátlás", például egy moderátor vagy vitaelnök formájában, hogy gátat vessen a végtelen vitáknak vagy megfékezzen egy narcisztikus örök beszélőt.



A mozgástervezésben és gondolkodásban fontos egykéreg-striatum-talamusz-agykéreg-nurokban szintezés visszacsatolás alkalmazó

Mi jelentőset ad hozzá a visszacsatolás az agykérgi hálózatok képességeihez?

1) **Iterálás:** egy döntés, gondolatmenet ismételt végrehajtása, kiértékelése. Az eredmény visszakerül a rendszerbe és újra kiértékelődik, míg meg nem születik egy jó megoldás. Ez működhet egy hálózaton (agykéreg modulon) belül, de modulok (részhálózatok) kölcsönhatása során is.
2) **Szupervízió (felügyelet), tanítás, kontextus adás:** a hierarchikus hálózatokban a feldolgozás magasabb szintjein kialakult eredményt a visszacsatolás visszajuttathatja az alacsonyabb szintek felé, ezáltal segítheti egyrészt azok információ feldolgozását, másrészt azok tanulását, azáltal, hogy a helyes megoldás mintázatát bemutatja a tanuló hálózatnak. A figyelem is valahogy így működik, a magasabb rendű, figyelmet vezérlő hálózatok megadják a megfelelő kontextust, fókuszt, ami irányba az alacsonyabb hálózatnak el kell mozdulnia. Amin belül, aminek segítségével a megoldást kell megtalálnia.
3) **Fennmaradó (perzisztens), spontán aktivitás:** a visszacsatolás azt is eredményezi, hogy egy ilyen hálózatba dobott információ (serkentő impulzus) tartós működést okoz, fennmaradó aktivitást vált ki. Ez egyrészt azt eredményezi, hogy aktuális bemenet nélkül is fejlődnek a mintázatok, feldolgozás zajlik és ha a tanulási mechanizmusok is működnek a hálózat fejlődik. Másrészt a fennmaradó aktivitás miatt a hálózatnak múltra emlékező belső állapota is lesz.



A képfelismerő hálózato és a ChatGPT mélyén lévő deep learning hálózatban nincsenek visszacsatolások, emiatt nincs belső állapota és saját aktivitása, csak a

Jelenleg a mesterséges intelligencia által használt deep-learning hálózatok ugyan többszintűek, hierarchikusak, de nincs jelen bennük rekurrencia, elsődlegesen előrecsatolt hálózatok. Az egymáshoz kapcsolt hierarchiában jelen lehetnek visszacsatolások, de nem

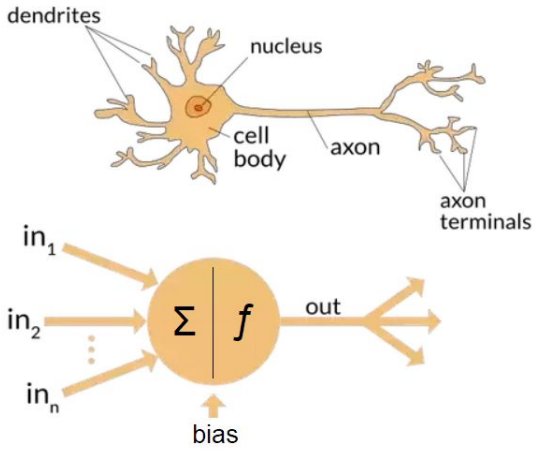
szerves részei ezeknek a modelleknek. Ennek egyik oka az, hogy itt ugye absztrakt idegsejteket használnak és a tanulás nem a hebb szabály, hanem a back-propagation alapján történik. A tanítás során az egyes kapcsolatok erőssége annak alapján változik, hogy mennyit kell változtatni a súlyokon ahhoz, hogy a kapott és az elvárt bemenet közelítsen egymáshoz. Ez egy visszacsatolt hálózat esetén technikailag nem működik. A visszacsatolás beépítéséhez alapvetően kellene megváltoztatni ezen hálózatok működését, de valószínűleg hatalmas előrelépést okozna az AI hálózatok működésében, hiszen a fenti 3 extrával lennének felszerelve.

Szerző: **Gulyás Attila**

Összefoglalás: Mit tudnak az idegsejthálózatok?

Gratulálok mindnekinek! Elértünk a kicsit hosszúra nyúlt második évad végében. Alant összefoglalom, hogy mit tanultunk a második részben, amiben az idegsejtektől a hálózatok szintjére léptünk és megnéztük milyen emergens tulajdonságok bukkantak fel.

Egy ioncsatornákból felépített idegsejt képes jeleket gyűjteni, összegezni, és jelet kibocsájtani, azaz elemi jelfeldolgozásra képes. Egy ilyen elemekből felépült egyszerű idegrendszer reflexekkel reagál a környezet egyszerű ingereire.



Az egyszerű, összead és tüzel (integrate and fire) idegsejtmodell egyetlen egyenlettel leírható, működése könnyen számolható.

A sok idegsejtből felépülő hálózatok már képesek több bemenet (tényező) alapján döntéseket hozni. A hálózat tudása a sejtek közötti kapcsolatok, a szinapszisok erősségének (súlyának) mintázatában tárolódik. Amennyiben genetikusan meghatározottak a kapcsolaterősségek akkor merev, ösztönös reakciókat valósítanak meg. A fejlődés következő lépcsőjén a sejtek közötti kapcsolatok erőssége a Hebbi asszociatív tanulási szabály szerint módosulhat: aki együtt működött az hosszútávon is együtt fog működni („Fire together, wire together!"). Az ilyen kapcsolatokat tartalmazó hálózatok alkalmazkodnak a környezet kihívásaira, rugalmasan reagálnak, megjelenik a tanulás!

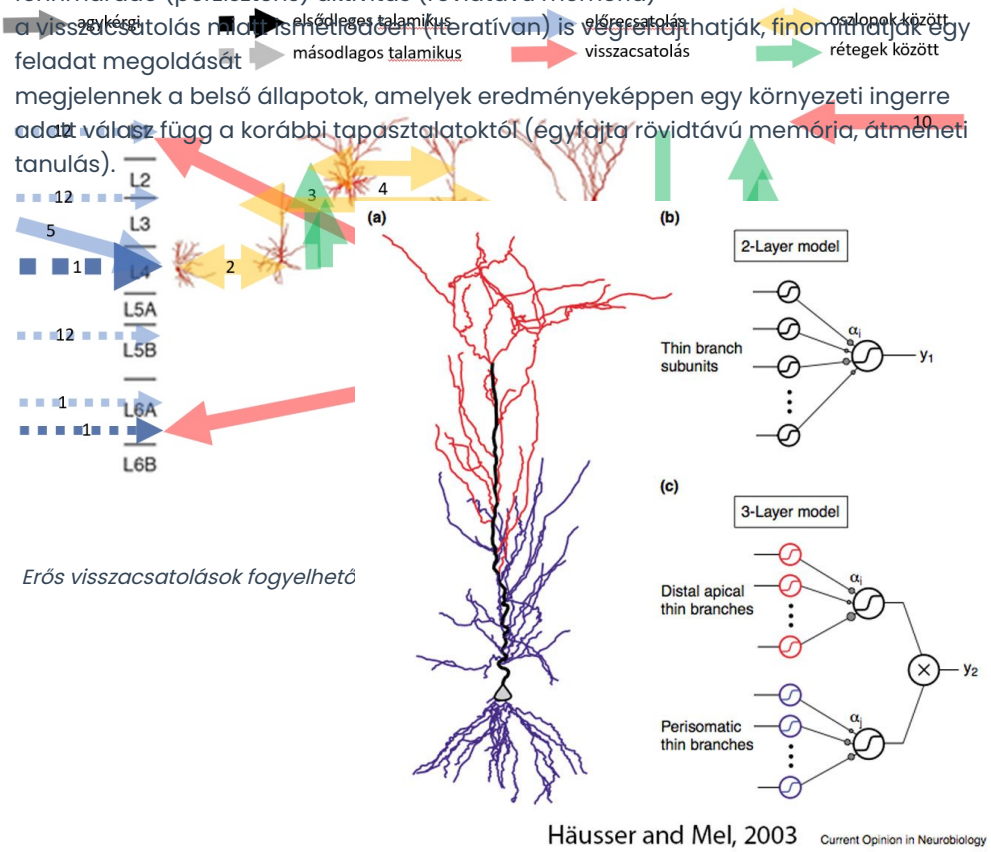
A hálózatok működését az is meghatározza milyen módon vannak a sejtek összekapcsolva. Az egyszerű hálózatok csak előrecsatoltak: a bemeneti réteg sejtjei a kimeneti réteg sejtjein végződnek. Már ezek az előrecsatolt hálózatok is képesek asszociációkat létrehozni, emléknyomokat előhívni, általánosítani vagy csoportokat alkotni.

A következő nagy lépés a hálózatok képességeinek javulásában az volt, amikor a hálózatokban megjelent a visszacsatolás. Ezekben, a sejtek önmagukkal és más saját rétegükben lévő sejtekkel is összekapcsolódhatnak, ezáltal a hálózat működésében lényeges új tulajdonságok jelennek meg:

- képesek lesznek mintázat sorozatok előállítására (pl járási mintázat, madárdal),
- kialakulhat bennük a külvilág kiváltó ingereit nem igénylő, azoktól függetlenül

fennmaradó (perzisztens) aktivitás (rövidtávú memória)

- a visszacsatolás miatt ismételtaden (iteratívan) is végrehajthatják, finomíthatják egy feladat megoldását
- megjelennek a belső állapotok, amelyek eredményeképpen egy környezeti ingerre adott válasz függ a korábbi tapasztalatoktól (egyfajta rövidtávú memória, átmeneti tanulás).

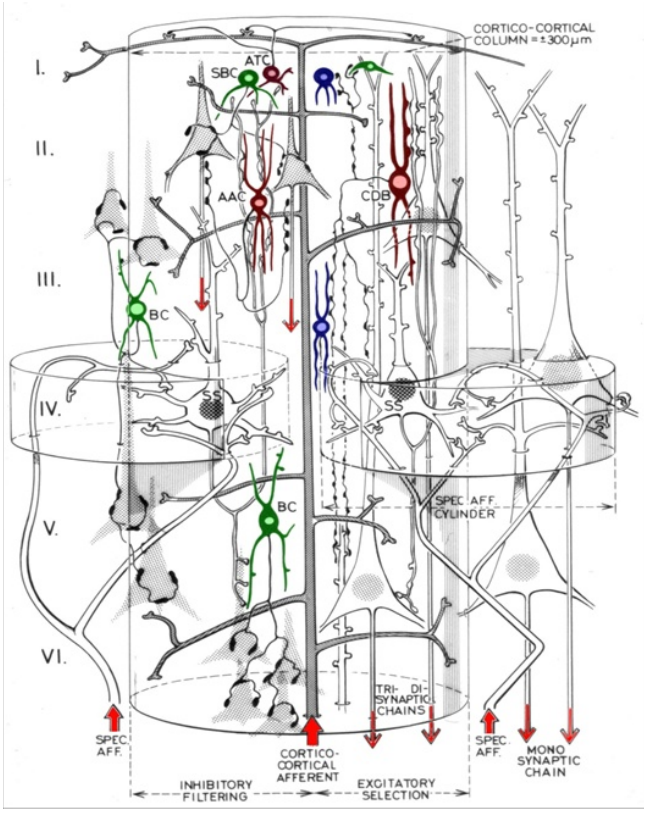


Erős visszacsatolások fogyelhető

A két és három lépcsős nemlineáris jelösszegződés modellje agykérgi piramis sejtekben. Egy-egy dendritágban is kialakulhatnak dendritikus akciós potenciálok, amennyiben elegendő a serkentés, ezek aztán kölcsönhatnak a sejttesten, vagy más dendritágakkal és így 2 vagy 3 lépcsőben alakul ki a sejt kimenete.

A másik, párhuzamosan fejlődés az idegsejtek jelintegrációs tulajdonságainak finomodása volt, melynek során az egyszerű, „összegzés és tüzelés" szerint működő sejt egy jóval bonyolultabb, aktív elektromos tulajdonságokkal rendelkező sejtté alakult, mely több szintű jelintegrációra vált képessé. Az egyes bemenetek kölcsönhatásba léphetnek, gyengíthetik, erősíthetik egymást, befolyásolhatják egymás tanulását (szinaptikus súlymódosulását). Igaz ez az egyes dendritágakra eltérő típusú információt hordozó jelek kölcsönhatására is. Megjelentek a sejteken olyan receptorok, melyek a kéreg alatti területekről, az állat belső állapotáról információt szállító moduláló (hangoló) típusú ingerületátvívő anyagok hatására, a sejtek jelintegrációját és tanulási képességeit különböző módokba kapcsolják.

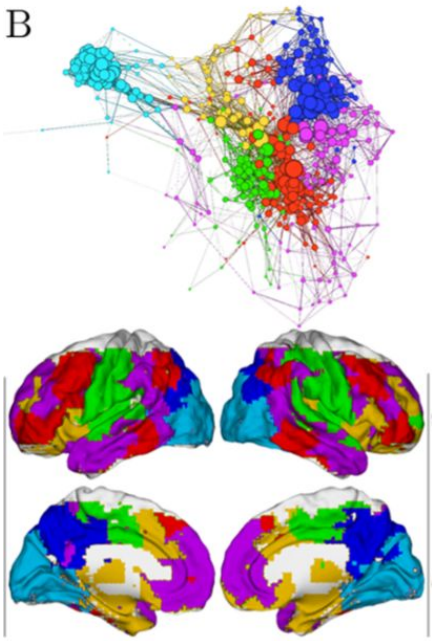
Ezek a fejlett tulajdonságok mind jelen vannak az evolúciós hálózat „tervezés" csúcsában az agykéregben. A 6 rétegű agykéreg oszlopokba szerveződött serkentő sejtjei összegzik az egyes rétegekbe eltérő területekről érkező eltérő információkat. A jelösszegzésben fontosak a sejtrétegek között kialakult visszacsatolt kapcsolatok, illetve, hogy a kéreg alatti területek működésének függvényében a sejtek jelintegrációja és a közöttük lévő kölcsönhatás erőssége a feladat függvényében változik.
Ezáltal képes az agykéreg bonyolult, rugalmas információfeldolgozás végrehajtására. A visszacsatolás miatt az agykéregben a tanulásban és információfeldolgozásban elsőrendű szerepet betöltő serkentő sejtek mellé gátlósejtek is beépültek (mint ahogy számos kéreg alatti területen már jelen voltak), mivel az egészséges hálózatműködéshez a sejtek aktivitási szintjét egy keskeny tartományon belül kell tartani. Egy működő agy esetében a túl alacsony aktivitás kómát, a túl magas epilepsziás rohamot jelent. A gátlósejtek fontos szerepet játszanak abban is, hogy a kéreg alatti területekről, az állat belső állapotáról, információt szállító pályák az agykérgi hálózatok információ feldolgozását, az aktuális feladat



A hálózat evolúció csúcsa a 6 rétegű neocortex egy oszlopa, melyben az inforációt feldolgozó serkentő sejtek működését küzéjük települ gátlósejtek ellenőrzik és hangolják.

megoldásához szükséges módokba kapcsolják. Hangolják és összehangolják az agykérgi hálózatok működését.

Az agykérgi hálózatok tehát képesek arra, hogy összevessék a jelen különböző elemeiről információt szállító pályákon érkező jeleket, a múltról a visszacsatolásnak (rövidtávú memória) és a szinaptikus súlyok megváltozásának (hosszútávú memória) köszönhetően tárolt információkkal, és az állat igényeinek (kéreg alatti modulációs információk) megfelelő bonyolult döntéseket hozzanak, befolyásolják a jövőt.



fMRI-vel megfigyelt kölcsönhatás hálózatok (fent) az agy eltérő működésű területei között.

A harmadik részben azt a szintlépést vizsgáljuk meg, hogy mi történik akkor, amikor az egyszerű hálózatokat egy magasabb szinten hálózatokba kapcsoljuk. Az agykérgi

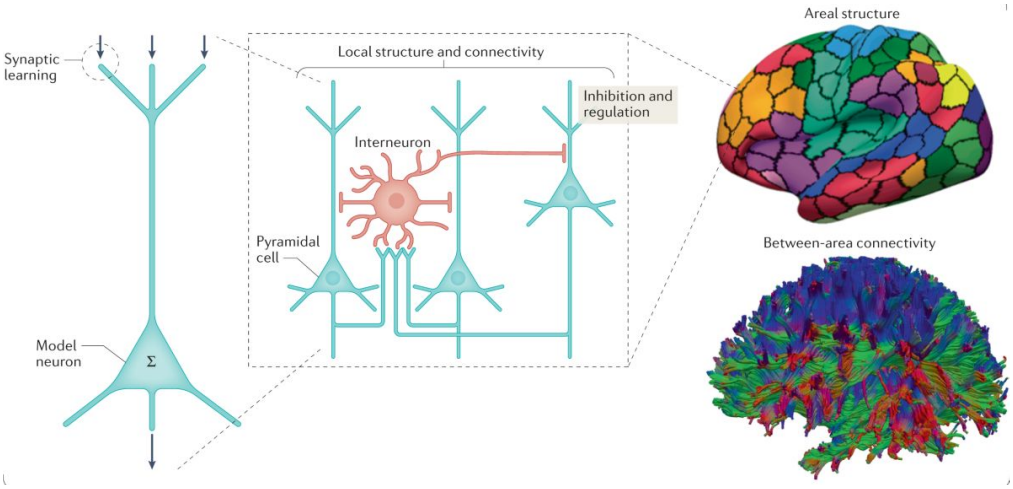
modulokból alkotott agykéreg területeket összekapcsoljuk egymással és a kéreg alatti területekkel, egy következő szintű hálózatba. Mit tud az agyi metahálózat? Valami olyasmire számítsatok, mintha egyetlen gyakorló hegedűs helyett, egy jól működő zenekart hallgatnánk. Az emergencia csodákra képes.

Szerző: **Gulyás Attila**

Harmadik évad: Az agyterületek kölcsönhatása és a belső modellek

Sétánk során elértünk a harmadik szerveződési szintre. Az első részben megismertük egy idegsejt részeit, hogyan alakulnak ki raja az elektromos jelek, hogyan terjednek és hogyan összegzi a sejt azokat. Megtudtuk mi a kémiai átvivő és moduláló molekulák szerepe. Néhány idegsejt összekapcsolásával a legegyszerűbb idegrendszerek már képesek egyszerű reflexek kivitelezére, egy egyszerű ingerre, egy egyszerű ösztönös, merev választ adnak.

A második lépéssel ezekből az idegsejtekből hálózatokat építettünk és bemutattuk hogyan reprezentálja a sejtek működése a külvilágot, hogyan tanulnak a sejtek, és hogyan képesek egyszerű döntéseket hozni ezek az egyszerű hálózatok. Bemutattuk az agykéreg bonyolultabb, számos visszacsatolással rendelkező serkentő és gátlósejtekből álló hálózatát, mely az egyes agykérgi területek moduljainak alapjaiul szolgál.



Az idegrendszer bonyolódásának három lépése, három szerveződési szintje: az idegsejt, a kishálózat és az agyi hálózatok, mely lépések a reflex, a döntés és a belső modellek által egyre hatékonyabb túlélést tesz lehetővé az élőlény számára.

Itt, a harmadik szakaszban eljutunk majd oda, hogy az agyi területek (elsősorban agykérgi modulok) hogyan kapcsolódnak a következő szinten agyi rendszerekké. Ez a második szintű hálózati kapcsolódás teszi majd lehetővé, hogy agyunk túllépjen az egyszerű döntésen és képes legyen a világ belső modelljének kialakítására, mely jelentősen segíti a megértést, a történések előrejelzését és irányítását, mely a túlélés egy hatékony új eszköze.

Az agy szerveződési szintjein felfelé haladó túránkhoz illően, használjunk földrajzos hasonlatot: eddig megismerkedtünk a domborzat elemeivel, a geológiával, az éghajlattal, az ökoszisztémákkal. Vannak hegyek, völgyek, folyók, fajok, társulások, ezekről megtudtunk alapelveket. Ami most következik az Földünk földrajzának részletes megismeréséhez hasonlítható. Azt mutatom be, hogy a névvel megnevezett hegységek, völgyek, folyók, síkságok hogyan alkotják Földünk 7 kontinensét, ezeken milyen országok találhatók, milyen a

klímájuk, élővilágúk. Azaz, áttekintjük az agy egyes területeit, mi a szerepük és hogyan hatnak kölcsön egymással.



Az agy tájképe

Vágjunk hát bele az agyföldrajzba, az agy tájanatómiájába. A makákóval, pontosabban látórendszerével kezdjük az ismerkedést a következő bejegyzésben.

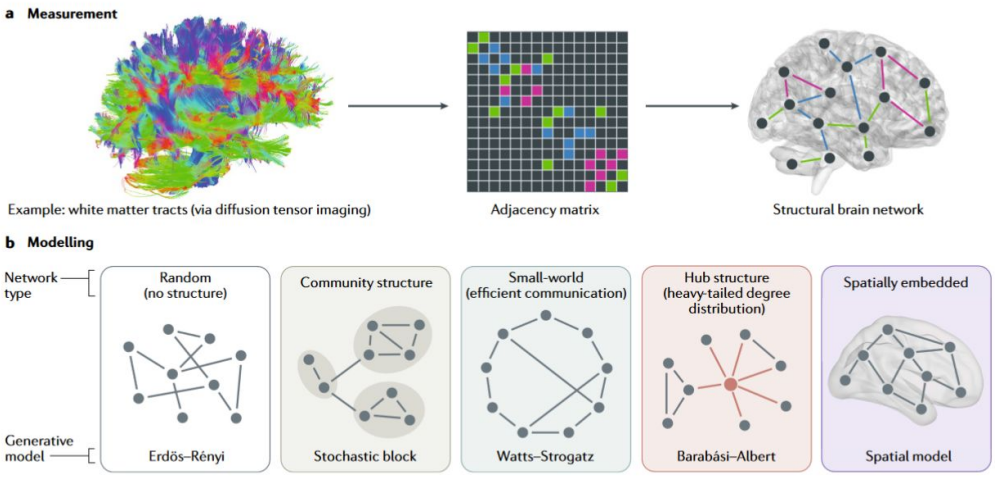
Szerző: **Gulyás Attila**

Hálózatok két szinten: nem minden agyi hálózat skálafüggetlen

A megígért makákó előtt még egy kis elméleties kitérő.

Mielőtt továbbmegyünk az #agysétával, üssük bele az orrunkat egy kicsit a manapság igen népszerű és sok mély belátásra vezető hálózatelméletbe, mely Barabási-Albert László munkássága kapcsán került a mindennapi nyelvezetbe. A hálózatelmélet a matematika egyik ágának a gráfelméletnek a része.

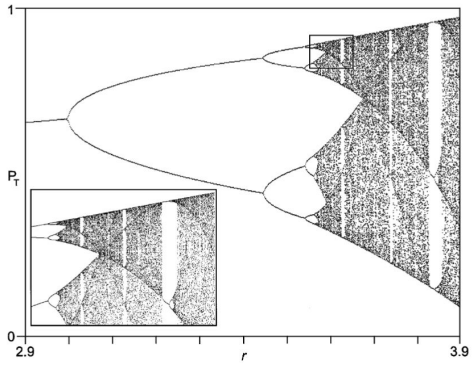
A gráfelmélet összekapcsolt pontokból álló struktúrák tulajdonságait vizsgálja. Egy gráfot (magyarul hívhatjuk hálózatnak) a matematikusok és a fizikusok (csomó)pontokkal és a pontok között futó kapcsolatokkal (élekkel) írnak le. Ugye az agy idegsejtek hálózata, azaz hálózat, azaz az agy szerkezete is vizsgálható gráfelmélettel és az ennek részét képező hálózatelmélettel. Ezt sokan, elsősorban nem biológusok meg is tették nagy lelkesedéssel.



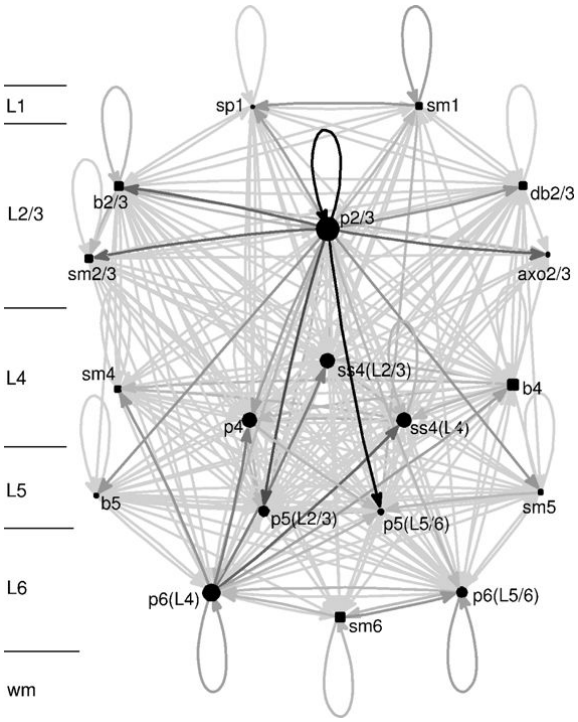
Agyterületek kapcsolatának hálózat-elméleti elemzése. Első lépésben azonosítani kell milyen agyterületek vannak (csomópontok) és ezek közül melyek vannak összekötve egymással (élek). Ezután lehet a hálózatik kapcsolatok sajátságait hálózatalméleti müdszerekkel elemezni.

Itt én most kicsit kotnyeleskedek, de az igazat megvallva a fizikusok/matematikusok is ezt

teszik az aggyal. Hasznosak az ilyen határtudományi kotnyeleskedések, de általában finomításra szorulnak a másik oldal részéről. Barabási nyomán, az elmúlt években sokat hallhattunk a skála független hálózatokról (legyen SFH, angolul scale free network). Hasznos idea, sok mindent lehet vele magyarázni, de mint ahogy minden aktuális üdvmódszerrendszert mindenre ráhúznak (a természettudományokban a fizikusok haljanak erre, hiszen ők foglalkoznak a világ struktúráival, voltak már ugye káosz, fraktál és egyéb korszakok), ezt is felületesen ráhúzták az agy működésére, pontosabban az agy összeköttetés rendszerére. Így utólag javítanék egy kicsit, és tisztába tenném hol vannak és hol nem az agy esetében SFH-k.



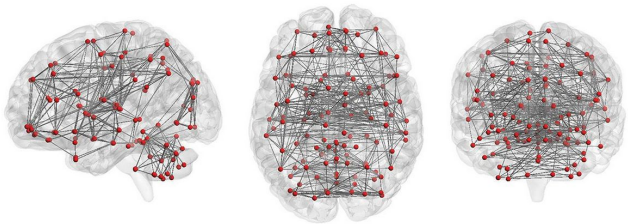
Kordokumentum a 80as évekből: A káoszt és fraktálokat egyaránt bemutató ábra. Egy kaotikus egyenlet lehetséges kimeneteinek ábrázolása. Szerkezete egy fraktált ad. A logisztikus egyenlet bifurkációs diagramja.



Egy kishálózat, az agykérgi oszlop kapcsolatrendszerének ábrázolása. Az egyes rétegekben található serkentő (kör) és gátló (négyzetek) sejttípusok elemszámát szimbólum mérete jelzi. A sejttípusok közötti kapcsolatokat szürke színskálás nyilak jelzik. A fekete nagy számú, a szürke kevésbé tömeges kapcsolatokat jelent. Az agykérgi kapcsolatok zöme ~80%-a serkentő-serkentő kapcsolat. Egy agykérgi oszlopban egy-egy sejttípus mindne sejtje hasonló mennyiségű (~7-25 ezer) kapcsolatot alkot.

Fontos, hogy az agyban két hálózati szint van, a kishálózatok szintje (második lépésünkben érintettük) és az agyi területek hálózatba kapcsolt hálózatainak szintje (harmadik lépésünkben fogjuk érinteni). E két hálózati szint teljesen más hálózati leírást igényel, az SFH leírás nem alkalmazható az alacsonyabb szintre, csak, (részben) a magasabbra.
Az alacsonyabb szinten, a kis hálózatokban viszonylag szigorú szabályok szerint lépnek kapcsolatba a serkentő (S) sejtek, a gátlósejtek (G) és a két csapat egymással. Ezek leírására nemigen használható a SFH megközelítés, mert 1) egy kishálózaton belül két tetszőleges sejt, között hálózatelméleti értelemben kb. ugyanolyan távolság van (ugyanannyi szinaptikus kapcsolaton keresztül éri el egymást két sejt), 2) minden sejt hasonló mennyiségű másikkal van összekötve, azaz nincsenek, kiemelkedően sok kapcsolattal rendelkező, bennfentes „hub" és marginalizált, magányos sejtek. Agyterülete válogatja, hogy egy sejt hány másikkal kapcsolódik (6-35 ezer között mozog), azaz milyen valószínűséggel lép kapcsolatba tetszőleges másik sejttel. Ezek a valószínűségek kicsit mások a S-S, G-G, G-S és S-G kapcsolatok esetében, de mindenesetre nem mutatják a SFH-ra jellemző jellegzetes eloszlásokat.

A hálózatosság magasabb szintjén, ahol különböző agyterületek kapcsolódnak egymáshoz, már alkalmazható a SFH-k ötlete. Itt ugyanis vannak kevés és sok kapcsolattal rendelkező agyterületek a hierarchia különböző szintjein. A hamarosan sokat emlegetésre kerülő hippokampusz, amigdala és főleg a homloklebeny bizonnyal pályázhat a hub pozíciójára. Bár óvatosnak kell lenni itt is, mert bár az agyban sok agyterület kapcsolódik össze sok másikkal, azaz sok hálózati csomópont és sok összeköttetés (él) van benne, ezek száma azért jóval alacsonyabb, mint a Barabási által tanulmányozott rendszerekben (pl. szociális hálók) ezért nehezebb kapcsolat-eloszlást számolni, mely támogatná a SFH elképzelést.



Az agyi nagyhálózat szerkezete: A nyugalmi állapotban levő agy területei között funkcionális képalkotó eljárással kimutatott kapcsolatok hálózata. Eltérő feladatok alatt az agyterületek más hálózati struktúrába kapcsolódnak. Ez a hálózat már rendelkezik egy SFH jegyeivel, vannak hub és kissé izolált területek.

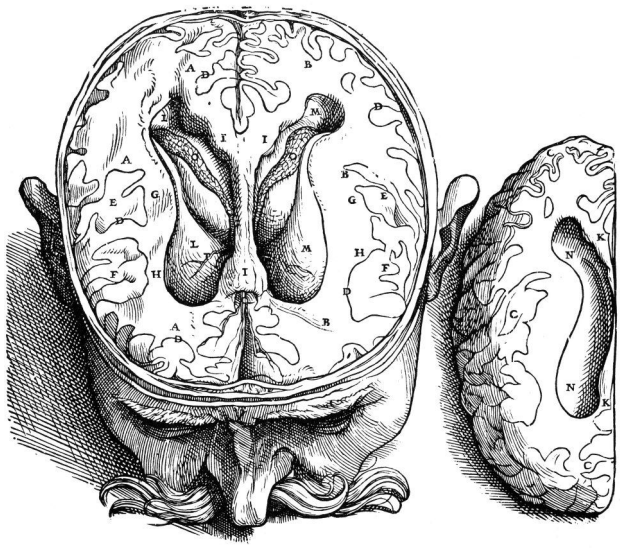
Legközelebb már tényleg a makákó jön.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agy felparcellázása: honnan tudjuk, hogy az agy egyes részei mással foglalkoznak?

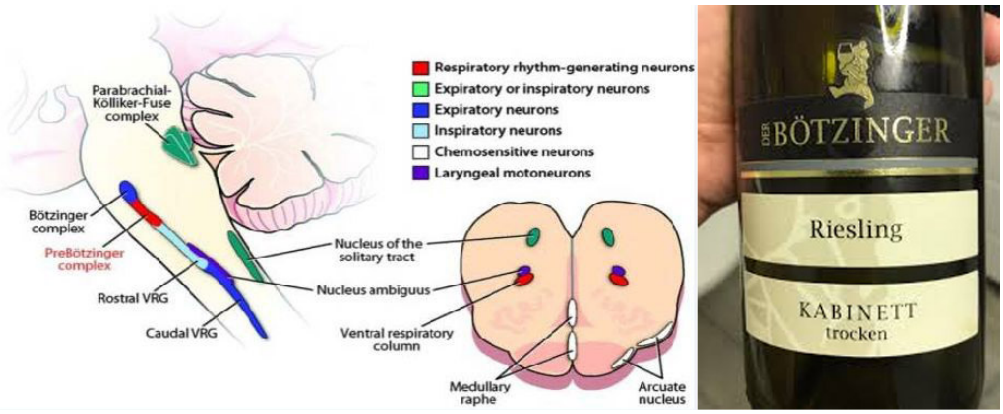
Sétánk a főemlősök látórendszerének bemutatásán keresztül szemléltet majd számos fontos agykéreg szerveződési alapelvet.

De, mint egy Tarantino filmben, a történet egészen máshol és máskor kezdődik. Az agy tájanatómiáját / makroszkópos anatómiáját már a rómaiak kapizsgáltak (Arisztotelész még nem annyira, szerinte az agy a takony elválasztásának szerve volt). De Galénus már az agykamrákba tette a gondolkodást, jelentős előrelépés. Az első alaposabb agyanatómiát a belga Vesalius alkotta meg a 16. században és már ő sem hitt Galenus elképzelésében. Kihagyjuk itt most azt a számtalan lenyűgöző kutatót, akik az agy magjainak és pályáinak leírásában részt vettek és csak a mondanivalónk szempontjából fontosokat említjük.



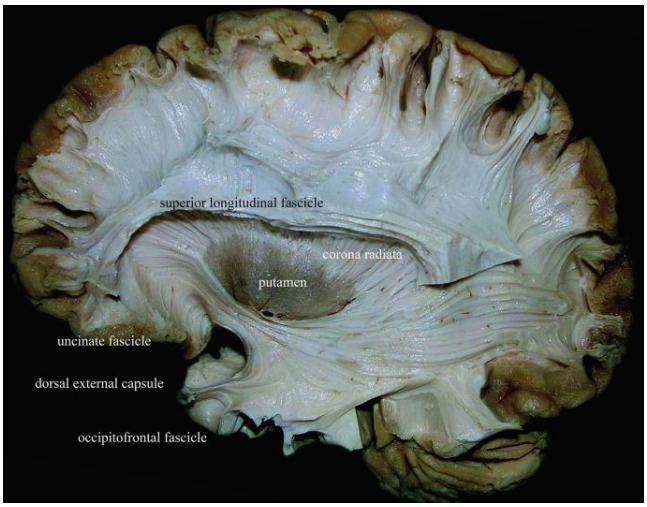
Vesalius ábrája az emberi agy szerkezetéről, kamráiról, ahova Galánus a lelket rakta. Komoly ábra, még a bajuszt is rárajzolták

No egyet azért említünk: a légzésritmus előállításában fontos pre-Bötzinger nevezetű agyi magcsoport elnevezését egy borfajtáról kapta, amit felfedezését követően a kutatók fogyasztottak.



Komolytalan szemelvény az agyterületek elnevezéséről. A ki és belégzés életfontosságú ritmusát adó nyúltagyi agyterületeket (Bötzinger és pre-Bötzinger) korunk jókedvű agykutatói a területek felfedezése után elfogyasztott Bötzinger rizlingről nevezték el.

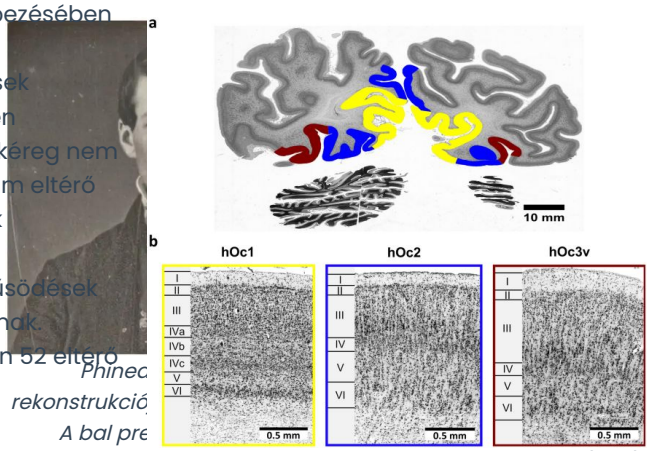
Azt már a makroszkópos (mikroszkóp nélküli, lásd szabad szemmel) leírás feltárta, hogy az előagy két féltekéjének felszínét egy szürkés bevonat az agykéreg alkotja, és ennek egyes területei precízen meghatározott rostkötegekkel vannak egymással, illetve alacsonyabb agyterületekkel összekötve. A rostkötegeket egy ügyes anatómus szépen ki tudja preparálni, ugyanis, az amúgy puding állagú agy formalinba helyezve radírgumi állagúvá keményedik, és a benne futó idegpályák rostkötegei mentén szépen hasítható. Ennek mai modern változata az MRIben felvehető „diffusion tensor imaging", mely ugyanezen rostkötegeket mutatja ki csak sokkal Csillagok háborúbbja módon. Ennek megfelelően leírták a két agyféltekét összekötő corpus callosumot (kérges test, majd később a hasított agy kísérleteknél még találkozunk vele) illetve az anterior commissurát (elülső agyköteg), valamint az agykéreg első és hátsó lebenyeit összekötő rostkötegeket és még számtalan másikat.



Az agy tompa bontásával feltárt fontosabb agyi pályák, melyek a fehérállományt alkotják és az agy felszínén található szürkeállományban (a fixált agyban itt inkább barnás) elhelyezkedő agykérgi területeket kötik össze egymással.

Azt, hogy az agykéreg nem egyegyenletes (homogén) struktúra és egyes agyi funkciókért eltérő agyterületek felelősek, igazán Phineas Gage vasútépítő munkás esetében sejtették meg 1848ban. Robbantómesterként dolgozott, és egy baleset alkalmával egy vasrúd fúrta át a fejét a bal szemétől a jobb koponyatetőig. Az esetet túlélte, de korábbi megbízható, barátságos személyisége eltűnt és egy léhűtő kötekedő emberré vált, cirkuszban mutogatta a fejét átlukasztó vasrudat. A következő megfigyelés az 1860as évekből származik. Két neuroanatómus, neuropatológus Broca és Wernicke agyvérzéses betegek agyát vizsgálva megállapította, hogy az azóta róluk elnevezett agyterületek a beszédértéshez (Wernicke terület) és a beszédhez (Broca terület) szükségesek.

Az agykéreg területeinek feltérképezésében (parcellázásában) a jó minőségű mikroszkópok és anatómiai festések segítettek sokat. Brodman 1909ben megfigyelte, hogy a 6 rétegű agykéreg nem mindenhol néz ki ugyanúgy, hanem eltérő területeken más az egyes rétegek vastagságának aránya. Az egyes agyterületek metszetén a sejtsűrűsödések vonalkód szerű mintázatot mutatnak. Ezeknek az eltéréseknek az alapján 52 eltérő agyterületet térképezett fel.

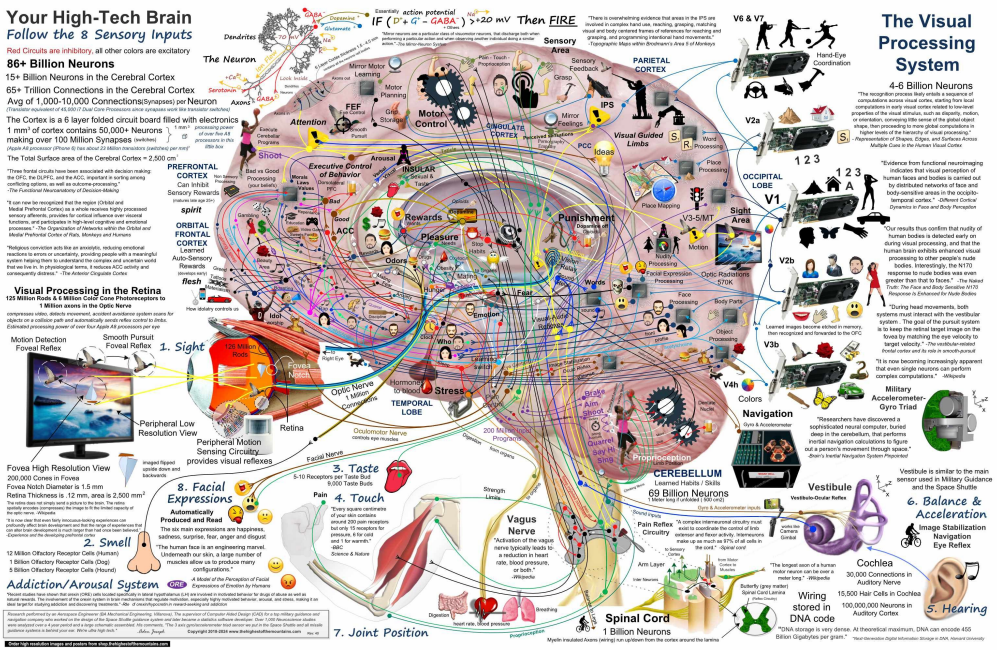


Phinec
rekonstrukció
A bal pre

A látókéreg bőrön és az agyon (Brodmann térképe) területe (fent) és az egyes kérgek mikroszkópos metszete, mely a 6 réteg sejteloszlásának megkülönböztető

Arra, hogy ezeknek az anatómiai eltéréseknek mi lehet a jelentősége, neurológusok, pszichiáterek és idegsebészek évtizedek alatt összegyűjtött megfigyelései mutattak rá. A témához egy szórakoztatóan olvasmányos könyvet, a Párbajozó idegsebészek-et ajánlanám, sajons magyar fodítása nincs (The duelling neurosurgeons).

Megfigyelték, hogy kis területre kiterjedő agykéregkárosodásokat (agyvérzés, fejsérülés) követően a páciensek igen egyedi agyműködés kiesésekről számoltak be. Az 1905-ös orosz-japán háború idején jelentek meg azok a nagysebességű puskalövedékek, melyek átütötték a koponyát, anélkül, hogy megölték volna a katonákat. Tatsuji Inouye japán orvos a háború poklába is próbált értelmet vinni, a gondjára bízott fejsérültek esetében pontosan feljegyezte a golyó útját és a betegek panaszait. Munkája alapján az emberi látókéreg egy igen pontos funkcionális térképe készült el. Azóta eltelt több mint száz év, adataihoz hozzátevődtek még az állatkísérletek pályakövető adatai, és legújabban a funkcionális képalkotó MR eredmények.



Az agy funkcionális területeit bemutató, igen cikornyás rajz. Érdemes letölteni és hosszasan tanulmányozni.

Ennek alapján egyértelművé vált, hogy a Brodman által leírt, anatómiailag eltérő területek

élettani funkciója is eltérő, azaz a szerkezet összefügg a funkcióval. Az egyes eltérő szerkezetű agykérgi területeket felfoghatjuk az alap agykéreg terv egyedi funkciókra módosított változatainak. Azt ugye már az agykéreg rétegeinek tárgyalásakor említettük, hogy attól függően, hogy érzékelő, mozgató vagy asszociációs területről van szó az egyes rétegek viszonylagos vastagsága eltér. Az élettani vizsgálatok végül jóval több eltérő szerepű agykérgi területet találtak, mint a Brodman által leírt 52. Ennek két oka is lehet, egyrészt nem biztos, hogy Brodmanminden anatómiai finomságot észrevett, másrészt attól, hogy két agykérgi terület szerkezete hasonló, lehet eltérő a funkciójuk, amennyiben a jelfeldolgozási láncban máshol állnak. Még ha hasonló jelmanipulációt is végeznek is,ha más feldolgozottságú jeleket kapnak, más eredményt adnak tovább.



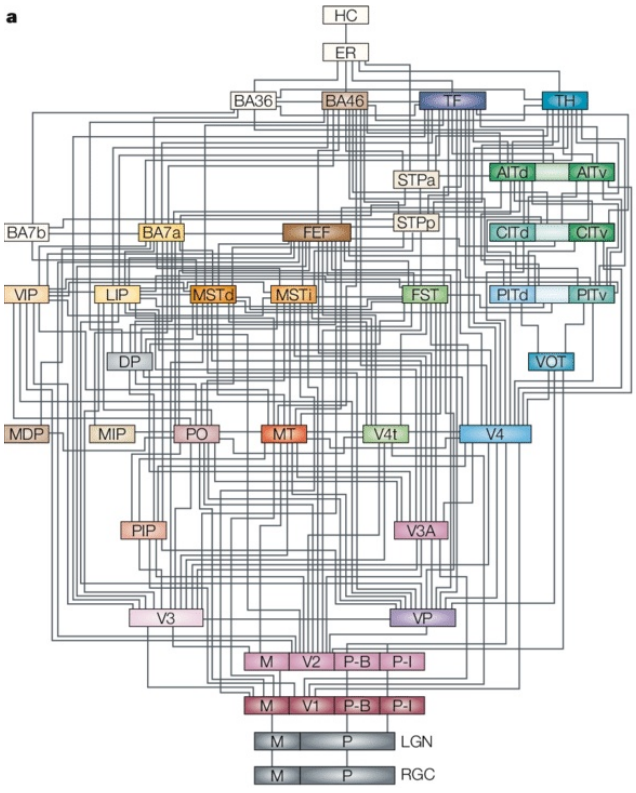
A következő történet hőse.

Mint ahogy egy túra során sem nézünk meg minden fát, itt sem megyünk végig az összes területen, hanem néhány érdekesebb réten megállunk. Az első réten egy Makákóval találkozunk.

Szerző: **Gulyás Attila**

A Makákó meséje: a látórendszer szerveződése

Kezdjük egy makákóval (óvatosan, meglehetősen erős, okos és vad főemlősök). Pontosabban a látórendszerében található anatómiailag és működésileg összekapcsolódó területek tulajdonságaival és kapcsolódási hierarchiájával.



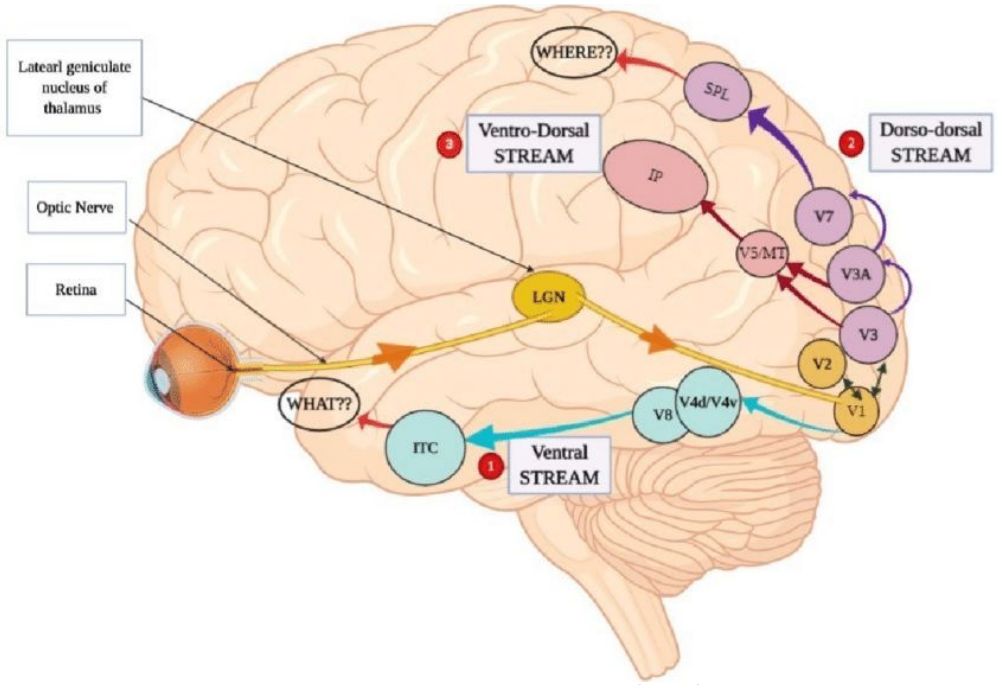
A főemlős látóterületek kapcsolati hálója. Alulról, a retina felől

Az ábrán vonalakkal összekötött dobozok a makákó látórendszerének 32 területét szemléltetik. Ezek mindegyike átlagosan 6-10 másikkal van összekötve, összesen kb. 120 összeköttetést alkotva. Ez egy igazi jó gráf, jó kis elemezni való hálózat. Vannak benne előrecsatolások, visszacsatolások, körök, ugrások, szét és összetartó kapcsolatok. A látóinformáció a recehártyáról a talamusz oldalsó térdes test nevezetű magján (LGN) keresztül elsősorban a V1-el jelölt elsődleges látó (vizuális) kéregbe kerül, de jut belőle máshova is (főleg a V2, másodlagos vizuális kéregbe). Innen aztán az egyes kéregterületek adják egyre tovább a feldolgozott, átgyúrt

a talamuszon keresztül érkeznek a jelek és a feldolgzási hierarchiában egyre magasabbra kerülnek.

jeleket, reprezentációkat. Egy agyterület egy másiktól több úton is kaphat információt, azaz a látó információ eltérő elemeit dolgozza össze. „Mi a vihart csinálhat ez a sok terület?" - kérdi az olvasó, joggal. Nos a recehártyában található csapok, az arra a pontra eső fénymennyiséget érzékelik. A talamusz sejtjei az egyes retina pontok és környezetük kontrasztját érzékelik, kiemelik a változásokat, a határokat. Az egyenletes fényerősségű területekről így nem sok jel jön (hiszen nem sok minden történik). A V1 agykéreg vonalakat, a vonalak irányát, helyzetét (durván), a V2 és a következők, sarkokat, forma elemeket érzékelnek.

Egy idő után szétválik az információáramlás két irányba. Az egyik irány mentén a látókérgek arra keresnek választ mit látunk (MI ág)? Ezek a területek a látvány elemeit, például szemet, orrot, szemöldököt azonosítanak, majd magasabb szinten ezek alapján azonosítják állítják össze az eltérő felépítésű arcokat és segítenek abbban kit is látunk pontosan.



A látásfeldolgozás egy idő után egy halántéklebenye felé (lefelé) fotó MIT ágra és egy a fali lebeny (felfelé) futó HOL ágra válik szét.

A másik irány azt firtatja, hol van, amit látunk, merre mozog, közeledik vagy távolodik (HOL ág)?

Arról, hogy a látás feldolgozásának részleteiért eltérő agyterületek felelősek, azt agyvérzésen és más kis helyen bekövetkező agysérüléseken átesett betegek beszámolóiból tudunk. Az a beteg, akinél a MI? ág károsodott el tud kapni egy neki dobott tárgyat, de azt már nem tudja látás alapján megmondani mi az. Igaz, ha alaposan körbetapogatja, felismerheti, hiszen a tapintó feldolgozása nem károsodott. De olyan beteg is akad, aki meg tudja mondani mi az a tárgy, de nem tud rámutatni vagy nem tudja átnyújtani, mert nem tudja térbeli elhelyezkedését érzékelni (a HOL ág károsodott). Kedvenc agyterületem ebben a témában a kérődző állatok látókérgében található. A világnak csak azt a csíkját látja, ahova a látóhatár esik, amikor az állat legeléshez lehajtja a fejét, és nagyon érzékeny arra, hogyha valami, akár csak nagyon lassan, megmozdul. Ezt az agyterületet azért faragta ki az evolúció, mert ezzel nagyon jól észre lehet venni, a szavanna füvében lopakodó oroszlánt legelészés közben. Akinek van ilyen túlélt, akinek nem volt megették.

A feldolgozás egy idő után eljut arra a szintre is, ahol a két irány újra összeolvad (a homloklebenyben) és az adott terület már mindent tud egy dologról.

De van tovább is. Nem csak a látó, hanem a halló, tapintó, testhelyzet érzékelő és szagló-ízlelő információk is hasonló többszintű feldolgozáson esnek át. Az egyes érzékszervekből érkező információt modalitásoknak hívjuk és mindegyik modalitásnak megvan az információ feldolgozó láncolata. A továbblépés akkor következik be amikor a különböző modalitásokból érkező információk is elkezdenek összefutni.

Erről szól a következő bejegyzés.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agykérgi feldolgozás szintjei és kölcsönhatásai: tudja a bal kéz mit csinál a jobb!

Az előző bejegyzésben a látásfeldolgozás egymásra épülő lépéseit és elágazásait mutattuk be. Hasonló lépcsőkben zajlik a többi érzékszerv (modalitás) feldolgozása az elsődleges és másodlagos (unimodális asszociációs) területeken.

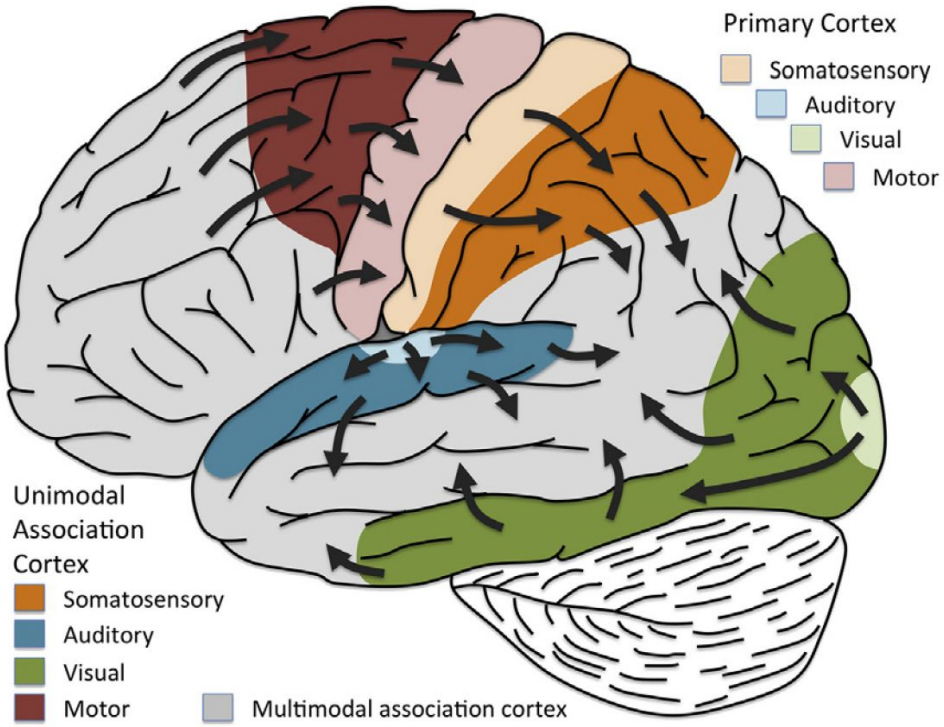
De nyilván mindenki belátja, hogy hasznos, ha érzékszerveink segítik egymást, pl. a látásunkat támogatja tapintásunk vagy hallásunk. Az agy is így cselekszik, léteznek olyan agykérgi területek (multimodális asszociációs területek), ahova több érzékszervből (modalitásból) futnak be magasan feldolgozott jelek melyek összefonódnak egymással, asszociálódnak. Pl- egy nagyothalló embernek sokat segít a szájról olvasás, egy gyengén látónak a hallás és a tapintás.



A McGurk effect a látás és hallás kölcsönhatását mutatja be a beszédfeldolgozás esetében. Megrázó.

Egy tudományos konferecián ezt a modalitások közötti (intermodális) hatást megrázóan szemléltette az előadó. Először egy videót láttunk, amin egy ember a pa-pa-pa hangokat majd utána a ga-ga-ga hangokat alkotta. Ezután, csak a két hangot hallottuk a hangszórókból, kép nélkül. A csattanónál, a hangszóróból a ba-ba-ba hangs szólt, de ehhez a videón a ga-ga-ga hangképzését mutatták. Megkérték a hallgatóságot, hogy nyitott majd csukott szemmel nézze a videót. Megrázó volt. Csukott szemmel ba-ba-ba-t hallottunk, nyitott szemmel pedig nem ga-ga-ga-t, hanem egy új hangot fa-fa-fa. Ahogy szemünket csuktuk, nyitottuk változott a hang amit hallottunk. Ami a szemünkbe és a fülünkbe érkező ellentétes információkból keveredett. Látásunk tehát befolyásolja hallásunkat! Az illúziót bemutató videót érdemes megnézni.

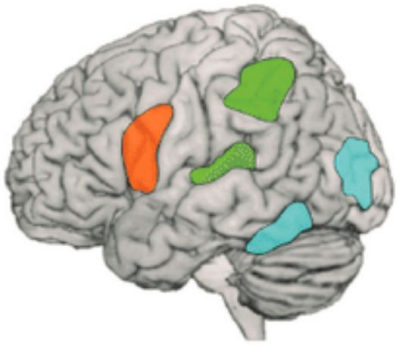
Egyik modalitás a másikat, gazdagítja, alakítja. Amikor egy finom étel vagy bort kóstolunk nem csak ízlelésünk, hanem szaglásunk is fontos (tán még fontosabb is). Náthásan nem érdemes ínyenc vacsorára menni. A COVID betegek egy részének hosszú időre vagy néha örökre elhaltak orrnyálkahártájában a szaglósejtek. Szegényeknek minden étel úgy tűnt mintha papírt ennének.



Az agykéri információfeldolgozás és áramlás lépcsői (hierarchiája). Az elsédleges kérgi területeket halvány színek jelzik. A hozzájuk tartozó másodlagos (unimodális asszociációs) területeket erős színek jelzik. Azokat a legmagasabb rendű kéregterületeket ahol több érzékszervből összefutó információ hat kölcsön a rajz szürkével jelöli. Nyilak jelzik az információ áramlás irányát. Míg a zérzékelés oldalán (látás, hallás, tapintás) az információ az elsődleges, másodlagos (unimodális asszociációs) és multimuodális asszociációs irányba terjed, addig a motoros (kimenet, válaszok) oldalon a homloklebeny (legfontosabb multimodális asszociációs terület, az agy elején, itt a bal oldalon), premotor kéreg (barna) és elsődleges mozgató kéreg az irány.

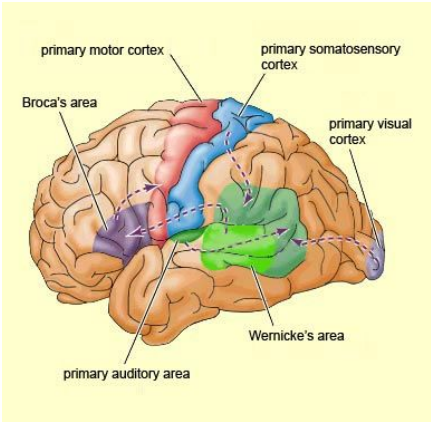
Vegyük át mégegyszer: az agykérgi feldolgozási lépcsők tehát: (1) az egyes modalitásokban, az elsődleges kérgekben elkezdődik a feldolgozás, innen tovább kerül (2) a másodlagos, unimodális asszociációs kérgekbe, innen az információ a multimodális asszociációs kérgekbe kerül (3). Ezek legmagasabbika a homloklebeny, az amigdala és a hipokampusz. Ezekben a kérgekben két dolog történik. Egyrészt a reprezentáció pontosításában (a megfelelő belső modell kiválasztásában) nem csak egy modalitás vesz részt, hanem több is. Például a szürületben pontosabban tudjuk hol van a madár, ha nemcsak azt látjuk, hogy ugrál, hanem halljuk is a neszezését. Vagy ha motyogós ismerősünket nem csak halljuk, hanem a szája mozgását is olvassuk.

Másik hatásként, megfelelően magas szinten, megjelennek modalitás független reprezentációk is. Azaz pl. van olyan agyterület, ahol megjelenik mondjuk az A absztrakt fogalma (az „A" modellje aktiválódik), függetlenül attól, hogy az A-t kimondta valaki, énekelte, egy fába vésve látjuk, Braile írással tapogatjuk vagy kalligráfiával van írva, esetleg Morse kóddal elpötyögve, sőt ne adj' isten hangszeren lejátszva. Máshol az adott pillanat élménye, az adott szituáció "szerelődik össze" belső érzékekből, látásból, tapintásból, hallásból és szaglásból.
Feltérképezve a multimodális területek elhelyezkedését az látható, hogy a legtöbb esetben ezek két csatolódó modalitást feldolgozó területek határán vannak. Ennek oka az, hogy az evolúció (és az általa kialakított agy) nagyon takarékos. A minimális hosszúságú agyi pályákkal ebben az elrendeződésben oldható meg a feladat. Rövidebb pályákhoz kevesebb axont kell építeni, és még a jelátvitel is gyorsabb. Ami az agyterületek pontos szinkronban tartásánál nagyon fontos. Hasonló trükköt használnak az elektronikus tőzsdék kereskedő programjait futtató cégek. A szerverek a tőzsde közelében vannak, mert bolond világunkban



Látás és hallás információt kapó agyterületek, melyek a két érzékszervből származó ingerek feldolgozását segítik elő.

még az sem mindegy, hogy a



Két multimodális terület: a beszédértésben fontos Wernicke terület (világos zöld) és a beszéd előállításában fontos Broca terület (szürkés-lila) a működésükhöz szükséges elsődleges és unimodális asszociációs területek közelében helyezkednek el. A beszédértésben fotnos a hallókéreg (sötétzöld), de a látó (szürke) és testérző (kék) kéregből is érkezik információ. A beszéd tervező Broca terület bemenetet kap a Wernicke területtől és kimenetet ad amozgató kéreg felé.

fénysebességgel terjedő elektromos jelek, melyek az adás-vételek utasításait szállítják, milyen gyorsan érnek el a tőzsdére.

Röviden ezeken a lépésen keresztül dolgozódnak fel a külvilág információi, az agy bemenetei.

De nefelejtsők, az agyi feldolgozásnak ugye van egy másik ága is, a tervezés, gondolkodás, mozgatás ága, az agy kimenete. Hiszen az idegrendszerek azért fejlődtek, hogy választ adjanak a környezet ingereire, a bementre kimenettel reagáljanak. Az agy ugye a csalánozók egyszerű reflexíveiből fejlődött: az érzéksejt, interneuron, mozgató sejt láncolat bokrosodott meg egy sokkal hatékonyabb döntésre képes aggyá, melyben a fent leírt feldolgozó hierarchia belefut a válasz megtervezésének hierarchiájába. A csúcs fogadó multimodális asszociációs kéreg a homloklebeny (prefrontális kéreg), többféle úton irányítja a mozgás előkészítést végző másodlagos mozgató kéreget, mely az elsődleges mozgatókéreg kimeneti hálózatát bízza meg a mozgás pontos megtervezésével. A kimeneten fordított az információáramlás iránya: multimodális asszociációs, másodlagos (unimodális asszociációs), elsődleges agykéreg a láncolat.

Szerző: **Gulyás Attila**

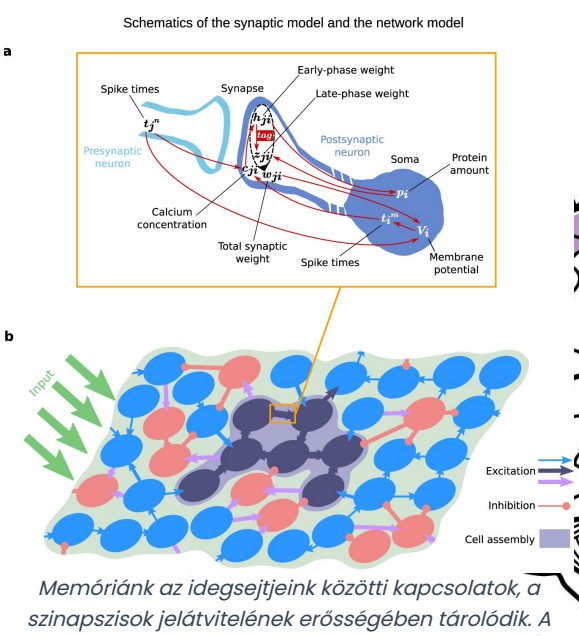
Hogyan tanulhatok hatékonyabban? A memóriák fajtái és kölcsönhatásaik.

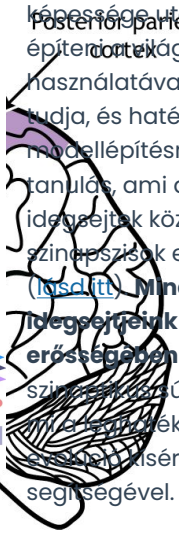
Ez egy rendszeresen visszatérő kérdés gimnazistáktól, nyilván, mert nagyon húsbavágó probléma. A hír rossz: Nincs csodálatos bogyó vagy üdvmódszerrendszer. Dolgozni kell. De azért, ha néhány dolgot megfogadtok az alantiakból sokat segít.

Zanzásítva:

- **Megfelelő módon kell tanulni,**
- **Aludni kell rá**
- **Ismételni kell és aktívan előhívni**

Induljunk ki onnan, hogy agyunk arra fejlődött, hogy segítse túlélésünket. Ahogy



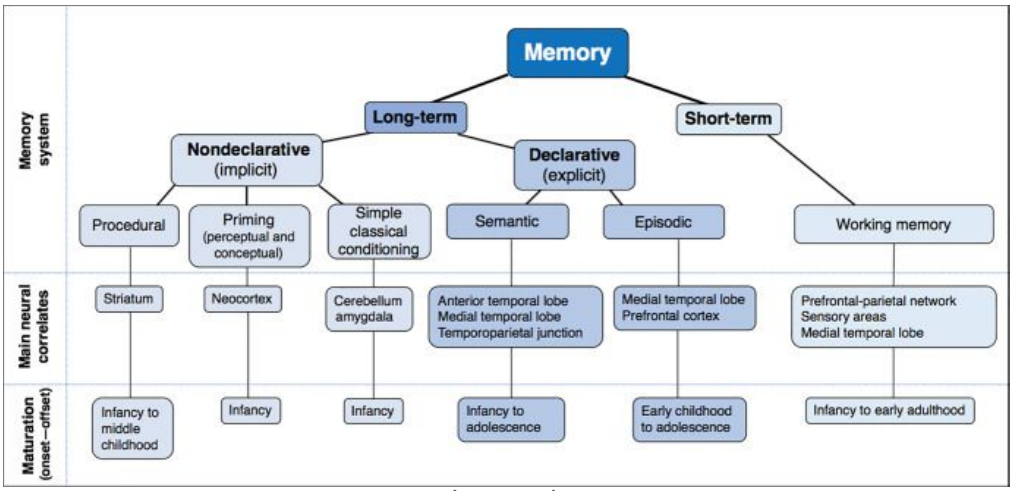


végiglépegettünk az evolúció lépcsőin, őseink idegrendszere az egyszerű reflex, majd a döntés képessége után modelleket kezdett építeni a világról, hogy ezek használatával a közeljövőt jósolni tudja, és hatékonyabban éljen túl. A modellépítésnek fontos eleme a tanulás, ami alatt az agyban az idegsejtek közötti kapcsolatok, a szinapszisok erőssége megváltozik (lásd itt). **Minden tudásunk az idegsejtjeink közötti szinapszisok erősségében tárolódik.** Azt, hogy a szinaptikus súlyok megerősítésének milyen hatékonyabb módja azt az evolúció kísérletezte ki sok halott ős segítségével.

Memóriánk az idegsejtjeink közötti kapcsolatok, a szinapszisok jelátvitelének erősségében tárolódik. A felső ábrán egy axon és egy dendrit kapcsolódása látható (lila és zöld), a szinapszis erősségét a kettő közötti kapcsolat vastagsága jelöli. Alatta egy mesterséges idegsejthálózat látható, ahol a szinapszisok erősségének megváltozása a tanulás során hasonló hálózat viselkedése.

Az ábra egy emberi agyat mutat, a homloklebeny, közép kék) kéreg a premotor kéreget (világoskék), ami az elsődleges mozgató kérgne (sötétkék) közvetlenül előtte található. Ezek a területek még posteriol parietal kéregtől is kapnak információt, ami egy multimudális asszociációs kéreg, és fontos szerepet játszik a figyelem, és a mozgástervezésben.

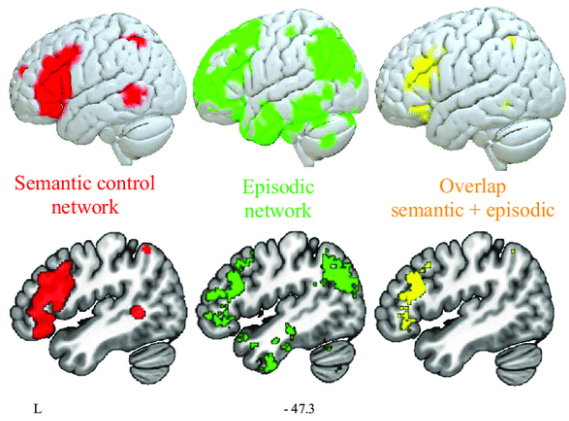
Agyunk irgalmatlan energiazabáló, drága fenntartani. Egy ember 100W-ot fogyaszt, ebből 20-25W-ot az agya. Azaz az evolúciónak a lehető legtakarékosabbra kellett faragni agyunkat. **Memóriánkba csak a lényeges dolgokat tölthetjük bele, mivel nem végtelen. E miatt agyunk csak azt fogja megtanulni, ami fontos, pontosabban, amit fontosnak vél**, és azon az alrendszeren keresztül tanulja, amelyiken keresztül a tudást használni fogja. A második, hogy **ha valami sokszor fordul elő akkor arra érdemesebb emlékezni, mint ami ritkán.**



A tanulás és memóriarendszerek típusai (felső rész), mely agyterületek vesznek részt az egyes memóriatípusok feoldolgozásában (közép) és melyik mikor alakul ki (alul). Részletek a szövegben.

A tanulás és memóriarendszerek bonyolultabbak, mint elsőre tűnik. Először is **agyunknak van rövidtávú, középtávú és hosszútávú memóriája.** Másrészt **a különböző dolgokat agyunk más részeivel dolgozza fel, ezért más részeken tanulunk** más módon dolgokat. A

rövidtávú memória vagy munkamemória a gondolkodáshoz kell, azt tartjuk benne, amivel éppen dolgozunk (homloklebenyben található). Amit fontosnak találunk bekerül a középtávú memóriába (hippokampusz és modális agykérgek) és innen, alvás során megerősödik, feldolgozódik és bekerül a hosszútávó memóriába (megfelelő agykérgi területek). Az fMRI képalkotó módszerével látszik, hogy agyunkban nem egyetlen memória van, hanem attól függően milyen típusú emléket hívunk elő más és más agyterületek csoportja kapcsol be. Attól függően mit tanulunk, a hosszútávú memóriából van nem-deklaratív vagy implicit memória, ilyen pl. a procedurális memória (amikor egy folyamatot, cselekvést tanulunk, pl. biciklizni, fűrészelni, szöveget szerkeszteni (ennek tanulásában a kéreg mellett a striátum és a thalamusz is részt vesz)) valamint a tények tanulásánál fontos memória, a deklaratív vagy explicit memória. Ennek típusai az epizodikus (egy élethelyzet, pillanat memóriája (hippokampusz)) és a szemantikus (tények, jelentések (magasabb rendű asszociációs területek, elsősorban a homloklebeny)) memória.



Az epizodikus (zöld, élethelyzet, esemény) és a szemantikus (piros, jelentés, tények) feldlgozásban és memóriában aktiválódó agyterületek. Van olyan terület (sárga), mely mindkét esetben bekapcsol. A felső sor az agy felszínére, az alsó sor 2D metszetben mutatja az aktív területeket.

Ami nagyon fontos, hogy csak azt fogja agyunk megtanulni, amit fontosnak tart. Pl. mert valami jó vagy rossz történt, ami a memóriához kapcsolódik, azaz valami érzelmi töltéssel rendelkezik. Nyilván nehéz pozitív érzelmeket rendelni pl. egy unalmas gazdaságföldrajzi adathoz (gimnáziumi traumám: hány tonna acélt termeltek 1950-ben Vuhanban?) vagy egy nagy adag dátumhoz a római királyság korszakából, de **érdemes motiváltnak lenni tanulás közben.** Nekem 9 és fél évig kellett oroszul tanulnom az iskolákban, de mivel semmi motivációm nem volt, szinte semmi nem ragadt meg. Amikor egyetemi terepgyakorlatokon voltunk a Szovjetunióban, akkor viszont nagyon sok rögzült, mert motivált voltam, hogy beszéni tudjak vendéglátóinkkal. Sokat segít például az, ha valami már meglévő tudáshoz, élményhez kötjük a dolgokat, mert akkor kölcsönösen erősítii egymást a régi és az új..

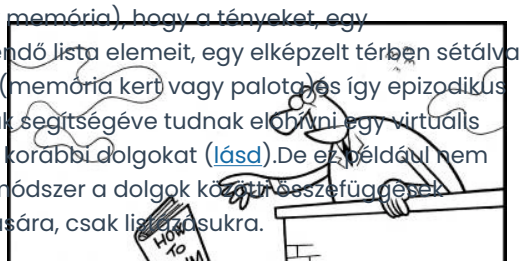
A másik fontos dolog, hogy **ugyanabban a modalitásban kell tanulni, amiben azt majd használni fogjuk**. A „könyvből nem lehet úszni tanulni" mondás nagyon igaz. Az úszástanulás egy a mozgató rendszerhez (motoros rendszer) kapcsolódó procedurális tanulás. Amikor könyvet olvasunk, akkor agyunk más rendszereit használjuk, mint amikor mozgást tanulunk. Hiába tudjuk elméletben mit kéne csinálni, ha azt nem gyakoroltuk mozgató rendszerünkkel, nem fogjuk elsajátítani. Ugyanez igaz mondjuk egy számítógép program használatára. Nem elég elolvasni mondjuk egy szövegszerkesztő használati utasítását, **le kell ülni és** a szöveg alapján **csinálni!** Vagy ha adatokat tanulunk, valamilyen módon aktívan alkossunk vele mondatokat, gondolatokat, mert akkor használódnak, beépülnek, vagy csináljunk belőle dalt, mint a Belga együttes a magyar királyokból.

Egy másik trükk, amit a memória atléták használnak őrült mennyiségű tény tanulására



Memória művész a palotájával.

(deklaratív memória), hogy a tényeket, egy megjegyzendő lista elemeit, egy elképzelt térben sétálva helyezik el (memória kert vagy palota) és így epizodikus memóriájuk segítségével tudnak előhívni egy virtuális séta során korábbi dolgokat (lásd).De ez például nem alkalmas módszer a dolgok közötti összefüggések megtanulására, csak listákra.

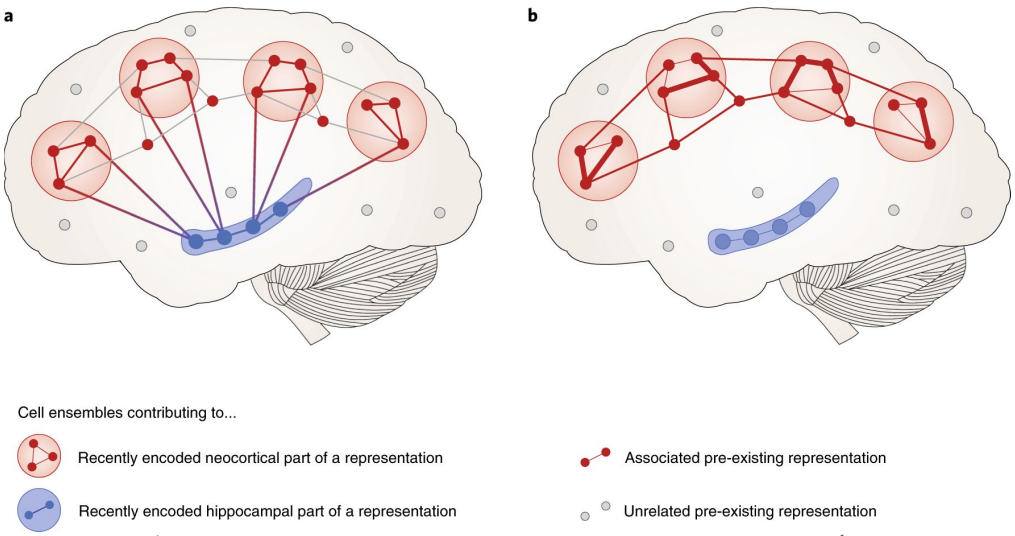


Fontos még hogy ha valamit sikerült is megfelelően motiválva, a korábbiakhoz társítva és a megfelelő modalitásban megtanulnunk, attól az még csak középtávú memóriánkba fog bekerülni.



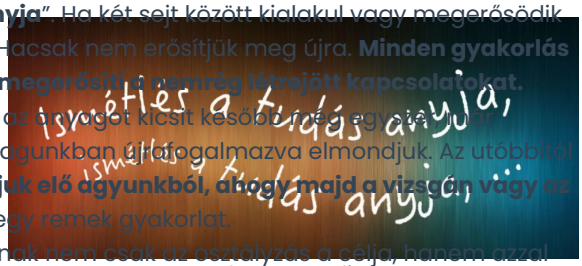
Lakásunkban egy útvonal bejárásával tudjuk dolgok sorrendjét megjegyezni.

Ahhoz, hogy hosszútávon emlékezzünk rá két dolgot kell még megtennünk. Egyrészt **aludni rá egy jót,** mivel az álom egyik funkciója, hogy a nap közben történt, fontosnak tartott dolgokat visszajátssza és korábbi tapasztalatainkhoz építi. **Ha nem alszunk, nem tanulunk.**A vizsga előtti utolsó áttanult éjszaka legfeljebb abban segít, hogy másnap félkómásan még vissza tudunk böfögni dolgokat, de azok biztos nem rögzülnek tartósan. Bár egyeseknél a pánik miatt bedobott adrenalin valamennyi hatással lehet (hiszen érzelmi töltést, a stressz töltését hordozza és ezért jó megerősítő), de nem ez a legjobb módszer, és alvás nélkül nem sok foganatja van. Én a magam részéről a vizsga előtti napon inkább elmentem moziba, evezni vagy túrázni. Többet ért, mint egy átszenvedett éjszaka.



Bal oldal: Ébrenlét alatt agykérgünk eltérő területein átmeneti emléknyomok (új szinaptiku kapcsolatok) alakulnak ki. Az emlékeket szervező hippokampusz (kék) ezeket a középtávú memóriában tartja. Alvás alatt a hippokampusz a fontos dolgokat visszajátssza és irányítja az egyes agykérgi területeken a fontos eókapcsolatok megerősödését. Jobb: Alvás után a megfelelő agykérgi területeken a megerősödött kapcsolatokat (vastag piros vonalak) már a hippokampusz segítsége nélkül is tudjuk használni.

Az utolsó „trükk” az „**ismétlés a tudás anyja**”. Ha két sejt között kialakul vagy megerősödik egy kapcsolat akkor az idővel gyengül. Hacsak nem erősítjük meg újra. **Minden gyakorlás vagy előhívás újra aktiválja és ezáltal megerősíti a nemrégiben jött kapcsolatokat.** Érdemes tehát arra is hagyni időt, hogy az anyagot kicsit később, mégegyszer nagyobb vonalakban átvegyük vagy magunkban újrafogalmazva elmondjuk. Az utóbbitól lesz **aktív a felidézés, olyan módon hívjuk elő agyunkból, ahogy majd a vizsgán vagy az életben kérdezik**. Erre egy puskaírás is egy remek gyakorlat.
Mellesleg azt is elárulom a dolgozatírásnak nem csak az osztályzás a célja, hanem azzal hogy aktívan előhívatják veletek az anyagot, a rögzülését is elősegítik.

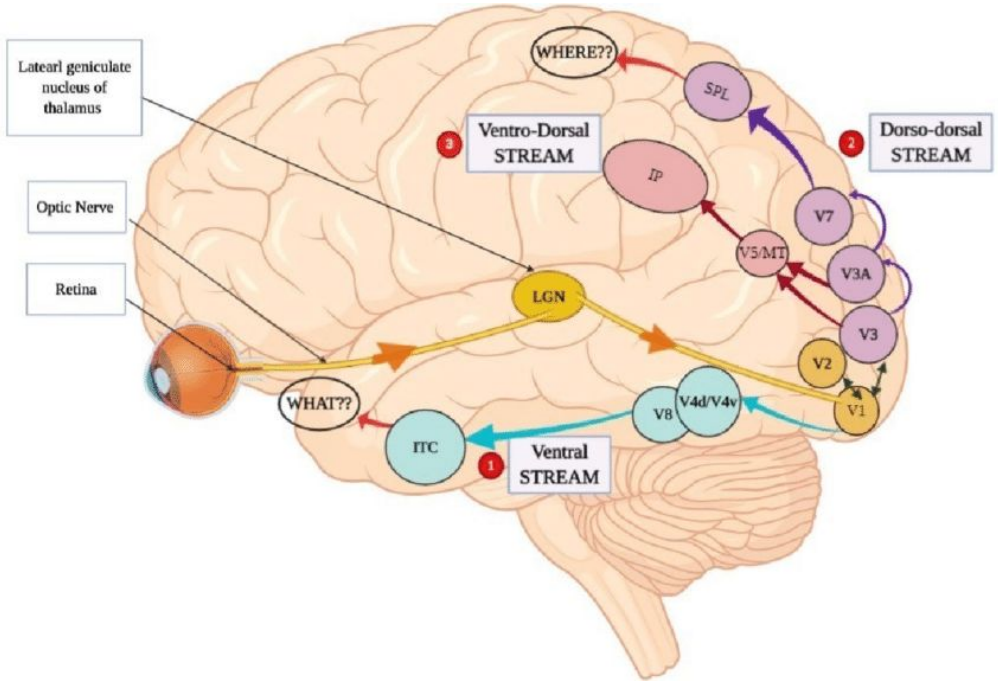


Ahogy mondja...

Szerző: **Gulyás Attila**

Ki-ki mellé telepedik az agykéregben? A modalitások kölcsönhatásai.

A látórendszernél megismertük, hogy a tarkólebenyen leghátul elhelyezkedő, nagyméretű elsődleges látókéreg előtt (V1) számtalan specializált látó terület keletkezett (V2, stb.), melyek a látás értelmezésének különböző feladatait látják el.

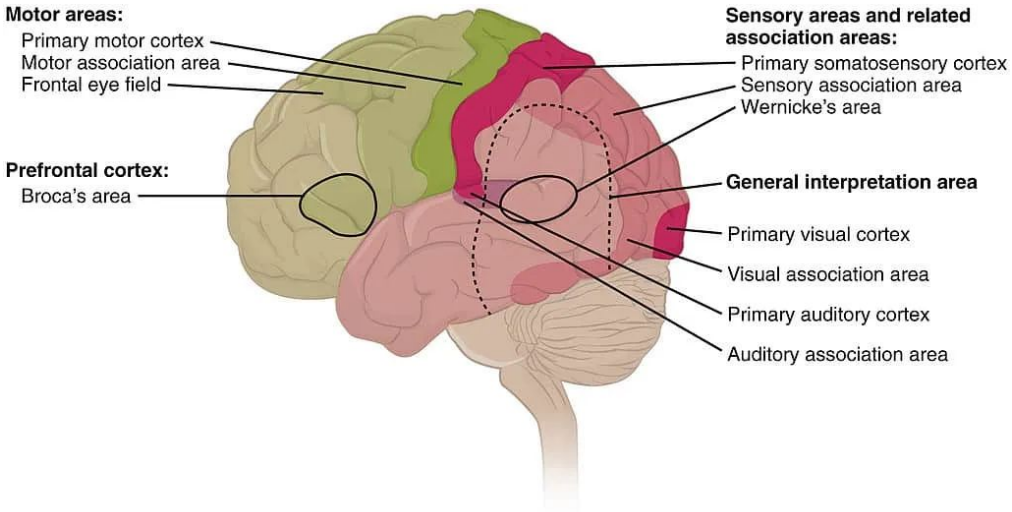


A látásfeldolgozás egy halántéklebenye felé (lefelé) futó MI? ágra és egy a fali lebeny (felfelé) futó HOL? ágra válik szét. A MI ág a halántéklebenyben található és a memóriában fontos hippokampusz közelében fut. A HOL ág pedig a testhelyzet érzékelésében fontos somatosenzoros (testérző) kéreg irányába fut, hiszen ezektől a területektől kapnak járulékos információt.

Szétválik az információ áramlása egy felfelé/előre tartó HOL/HOGYAN? és egy lefelé tartó MI? ágra. Már a két irány szétválása sem véletlen, a felfelé tartó HOL/HOGYAN? ág területei a testérző és mozgató kérgek irányába esnek, hiszen a látott tárgy helyzetének és mozgásának értelmezése kapcsolódik ahhoz, hogyan mozogjunk. Nem mindegy merre van a tárgy, amit meg akarunk fogni, megközelíteni vagy éppen elkerülni. A lefelé/előre tartó MI? ág területei pedig a halántéklebeny felé keletkeztek, hiszen ennek mélyén, többek közt a hippokapmuszban történik meg a dolgok és események azonosítása.

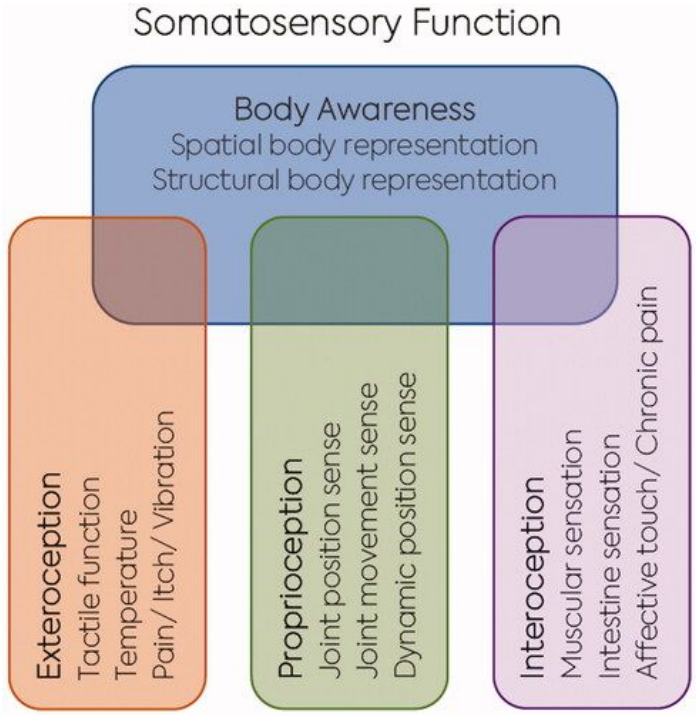
A hallás feldolgozása a halántéklebenyben történik meg, a látáshoz hasonlóan ez is több lépésben (A1, A2, A3 területek). A rézusz majomban 15 hallókérgi területet különböztetnek meg, melyek elsődleges bemenetüket a talamuszból kapják. A hallókéreg feldolgozza a

hangok összetételét (spektrumát), időzítését és elhelyezkedését. Itt is megtalálható a lefelé tartó MI? és a felfelé tartó HOL/HOGYAN? ág. Az utóbbi az emberekben (első sorban a bal oldali) fontos a beszédben és az ajakról olvasásban is, hiszen a szavak jelentését kell azonosítani, illetve előhívni. Ezekhez a feladatokhoz intermodális kapcsolatok alakultak ki a látó és halló feldolgozó agykérgi területek között. A két beszédben fontos terület a Broca és a Wernicke területek a hallókérgek és a fali lebeny között találhatók a bal féltekében. A beszéd kivitelezésében fontos Broca terület a gondolkodásban fontos homloklebeny mögött helyezkedik el, a mozgatókéreg előtt, hiszen oda kell továbbítani a beszédképzéshez szükséges parancsokat. A beszédértésben fontos Wernicke terület a hallókérgek és látókérgek határán (lásd az ajakolvasáshoz is szükséges látás közelsége) a testérző kéreg mögött található. Ezek a területek az írás/olvasásban és a jelnyelv használatában is fontosak.



Az érző (piros) és mozgató (zöld) kérgek elhelyezkedése az emberi agyban . Az elsődleges területek (erős színek) másodlagos területekkel (halványabb színek) vannak körülvéve. A beszédértésben és beszéd létrehozásban fontos multimodális asszociációs érző (Wernicke) és mozgató (Broca) területeket vastag keret jelzi.

A testérző kéreg is hierarchikusan szerveződik és természetesen a talamuszon keresztül kapja elsődleges beenetét. Az elsődleges somato-szenzoros (S1, Brodman 1-3 területek) kéreg nem csak a tapintási ingerek feldolgozásában fontos, hanem a testhelyzet érzékelésében, és a mozgás-testhelyzet fenntartásához szükséges izom erőfeszítés mértékének ismeretében is. Az erős érintéseket és a hőmérséklet érzet feldolgozása is itt történik. A feldolgozás során az érintett tárgyak textúrájának (kemény-puha, érdes-sima, nedves-



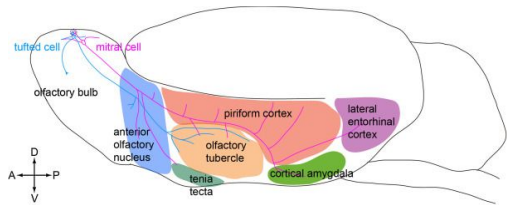
A testérzés elemei (alsó három doboz), melyekből testtudatosságunk áll össze (fent). Exterocepció:a külvilűg

száraz), méretének és alakjának vizsgálatára szakosodott kéreg területek is vannak. A másodlagos

ingereinek érzékelése; propriocepció: ízületeink, izmaink helyzetének érzékelése és Interocepció: zsigereink, és belső érzéseink

érző kéreg (S2) kapcsolatban áll az amigdalával és a hippokampusszal, melyek fontosak az érintési memóriában. dolgozódnak fel finom érintések, a fájdalom és zsigeri ingerek és az érintési figyelem is itt található (merre mászott végig a pók). Magasabb szinten a látás és tapintás összehangolása történik meg. Az agytekervények mélyére temetett insula (sziget) nevű agykéreg pedig fontos testtudatunkban, testhatáraink érzékelésében, az érzéki érintések átélésében és a viszketés kialakításában. A viszketés egy fajt memória, valami történt a bőrünkkel és emlékeztet rá, hogy nézzük meg, szedjük le a bogarat vagy vakarjuk le a rátapadt izgató növényi darabokat. A társas érintkezésben fontos érintésekkel kapcsolatos információt a limbikus rendszer részét képező övtekervény (gyrus cinguli) felé továbbítják a testérző kérgek.

Végezetül a magasabbrendű érző területek a mozgató kéreg felé küldenek visszacsatoló információkat arról hol tartanak mozdulataink, mik a lehetőségeink.



Az egér szaglórendszere. Az egér agyának jelentős része a szaglás feldolgozásával foglalkozik.

A szaglás feldolgozása kicsit máshogy történik, hiszen ez a modalitás az előagy sajátja, a többiek csak gyüttmentek itt, betelepültek, hiszen evolúciósan korai feldolgozásuk nem az előagyban történik. Míg a többi érzékszerv esetében a jelek a talamuszon keresztül érkeznek, a szaglás teljes feldolgozása az előagy két féltekéjében történik (a szaglógumó az előagy kitüremkedése, mint ahogy a szem a középagyé). A szaglókéreg részei a szagló gumók, a piriform (körte alakú) vagy más néven orbitofrontális kéreg, a sokat emlegetett amigdala és a parahippocampális tekervény. Mi emberek már kinőttük a szaglást, mint elsődleges érzékszervet, de egyszerűbb gerincesekben ez az elsődleges érzékszerv és az evolúció során kialakuló agykéreg rendszerei is erre épültek rá. Nem véletlen, hogy az érzelmek kialakításában fontos terület az amigdala, illetve a memória kialakításában fontos terület a hippokampusz az ősi szaglóagy részei, hiszen a kéreg evolúciójának kezdetén a legfontosabb érzékszervünk a szaglás volt. Ennek alapján döntötték el apró, szőrös, üregekben élő, éjszaka mozgó őseink, hogy mitől féljenek, mit lehet biztonságosan megenni és környezetük mely szegletében vannak éppen.

Szerző: **Gulyás Attila**

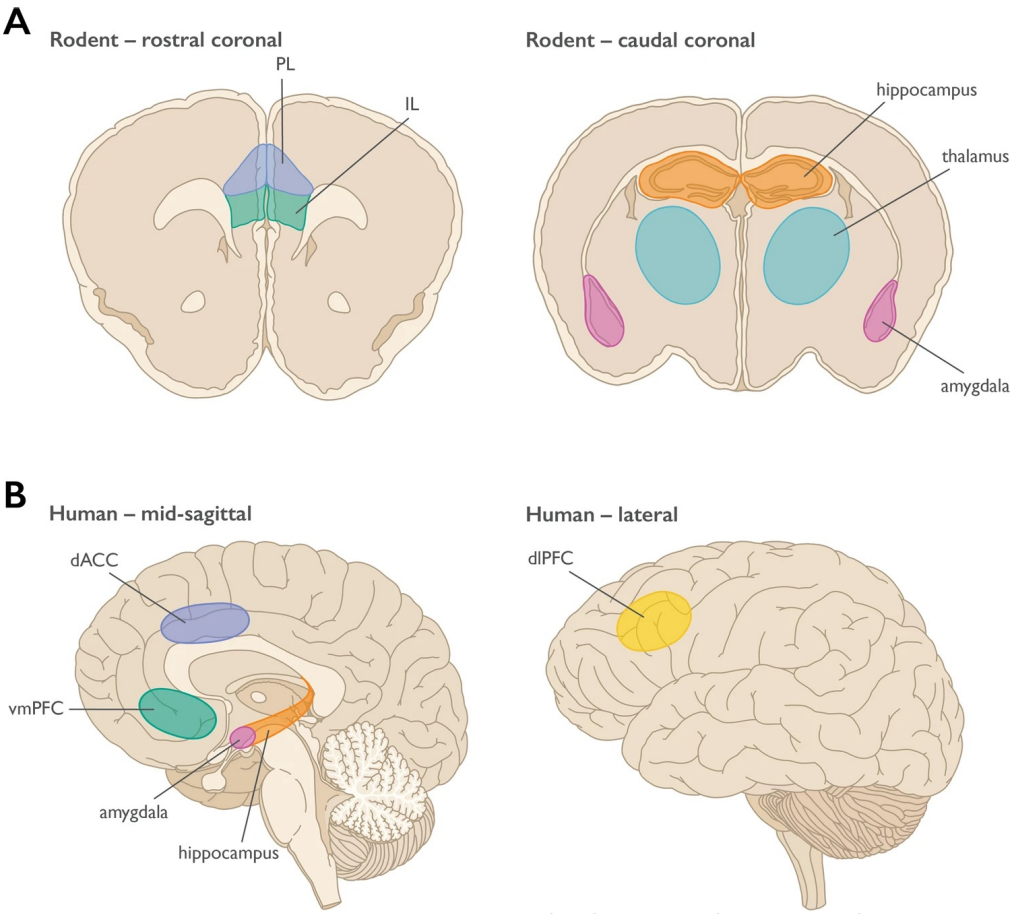
Multimodális asszociációs területek, ahol az információk összefutnak: a hippokampusz, az amigdala és a homloklebeny

Hosszú szünet után újra indul az agyséta. A harmadik szerveződési szint, az agyi területek kapcsolatának bemutatásához nekem is el kellett olvasnom egy csomó könyvet, ehhez idő kellett.

Megtudtuk ugye, hogy az egyes érzékszervekből érkező ingerek feldolgozása számos lépcsőben történik. Az elsődleges és másodlagos modális kérgekből az információk egy idő után elkezdenek keveredni egymással, hogy az érzékszervek kisegítsék egymást.

Az információ így eljut az asszociációs kérgekbe. Ezek közül soknak egyedi funkciójú van, de

most három magasan multimodális, azaz minden érzékszervből magasan feldolgozott információ kapott agykérgi területet fogunk bemutatni. Ezek között két ősibb terület van, **a memória kialakításában alapvető hippokampusz**, valamint **az érzelmek és viszonyulások létrehozásában alapvető amigdala**, illetve egy evolúciósan viszonylag újonnan fejlődő terület, **a magasabb rendű gondolkodásban, döntésekben és az agyterületek kölcsönhatásának szervezésében fontos homloklebeny**.



A multimodális csúcs feldolgozási területek az egér (fent) és ember (lent agyában). Az amigdala (lila), a hippokampusz (narancs) és a homloklebeny (zöld, kék, és az emberben megjelent dlPCC, sárga) az érzékszervi információk más aspektusait dolgozzák fel, de erős kapcsolatrendszerek útján egymás működését is alakítják. PFC: prefrontal cortex, azaz homloklebeny, ACC: anterior cingulate cortex, azaz elülső övtekervény.

Ez a három terület kicsit másképp feldolgozott módon kapja meg az összes érzékszervi információt, és eltérő szempontból is dolgozza fel, értékeli ki azokat. A három terület masszív, kölcsönös összeköttetésben áll egymással, adnak és kapnak információt ahhoz, hogy mind a hárman tökéletesen működjenek. Kapcsolatuk nem csak támogató, hanem ellentétes is, ha kell gátolják egymás működését, mint egy jól működő államban a megfelelően szétválasztott, hatalmi ágak, a rendőrség, ügyészség és bíróság. Mint majd látjuk személyiségünk alakulása szempontjából nagyon fontos a gyanakvó amigdala és a józan megfontolást képviselő homloklebeny birkózása. Munka közben azonban mindketten a pártatlan hippokampuszhoz fordulnak a memóriában tárolt információért, mint a főnök a jó titkárnőhöz, aki mindenről tudja, hogy hol kell utána nézni.

A következő bejegyzésben a hippokampusszal fogjuk kezdeni.

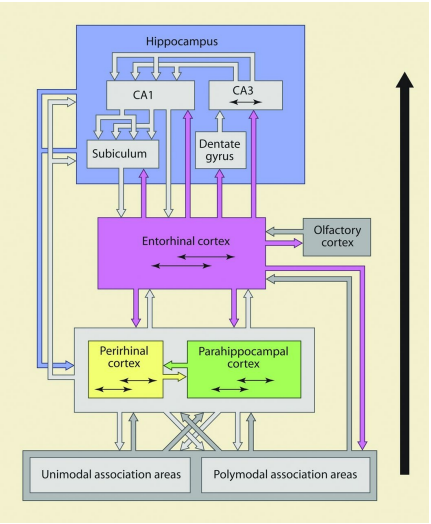
Hippokampusz - Az élmény: hogyan éljük át a pillanatot és mit tanuljunk meg I.

A hippokampusz a modern előagy egyik legősibb része, a limbikus rendszerhez tartozik. Az agykéreg fejlődésének egy egyszerű állapotát őrizte meg. Mindennek ellenére agyunk egyik legfontosabb területe.



A hippokampusz a halántéklebeny mélyén helyezkedik el. Ammon szarvnak is hívták a régi anatómusok, mert úgy tekeredik az agy oldalkamrái köré mint a kos szarva.

Az alacsonyabb rendű asszociációs agykérgek összefésülik az érékszervek feldolgozott információit és a hippokampuszba továbbítják (az entorhinális kéreg közvetítésével). Így a hippokampusz idegsejtjeinek aktivitása egy-egy pillanat lenyomatát és a pillanatok egymásutánjainak moziját hordozza. Itt alakul ki az ÉLMÉNY. Amikor ezt írom a MÜPA előtt kiakasztott függőágyban ülök (ezt a szövegrészt még nyáron írtam, annyira azért nem vagyok kemény). A pillanatom a hűvös szellőből, a Duna illatából, a felkapcsolt lámpák fényéből, az előadás végére készülő, széktologató pincérek zajaiból, a combomat nyomó függőágy érzéséből, a világító laptopból és egy kicsit korgó gyomorból áll. Tudatában vagyok a környezetemnek és a belső állapotomnak, hippokampuszom tárolja azt is, hogy mi történt a közelmúltban, hogy jutottam ide stb. Hippokampuszomban találhatók olyan idegsejtek és megfigyelhetők olyan sejtaktivitás mintázatok melyek akkor aktívak amikor egy bizonyos helyen vagyok vagy egy bizonyos dolgot csinálok. Hippokampuszom a velem történt dolgok térképét hordozza.



A hippokampuszba (kék) a Perirhinal

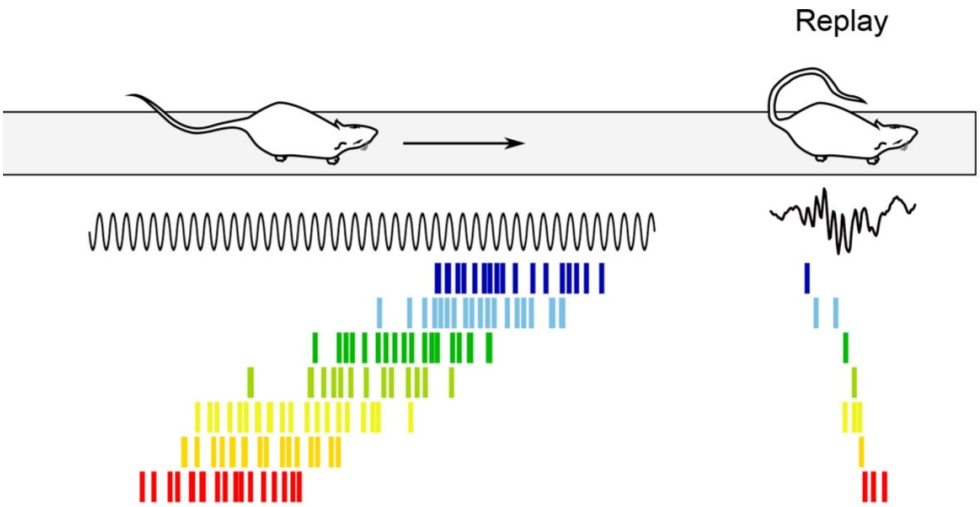
De miért csinálja mindezt? Azért, mert a



A pillanat élménye látási, hallási, tapintási, szaglási és belső érzékelésünk, állapotunk elemeiből áll össze.

(sárga) és a Parahippocamal (zöld) és az entorhinális kéreg (lila) közvetítésével jutnak el a különböző érzékszervi információk az uni és multi-modális asszociációs kérgekből (szürke).

hippokampusz felelős a memória létrehozásáért. Pontosabban a dekalaratív, azaz tény memóriáért, a procedurális, azaz a mozgásmemóriában más agyi rendszerek vesznek részt). A memória ugye azért kell, mert annak alapján vagyunk képesek arra, hogy korábban elkövetett hibáinkat elkerüljük és a jó megoldásokat válasszuk. Ehhez pedig az kell, hogy felismerjük egy helyzetről, hogy ilyenben már voltunk és megkeressük mit csináltunk olyankor. Memóriánk véges, ezért nem mindegy, hogy mit tárolunk el benne. Buzsáki György magyar idegtudós a hippokampusz működésének egyik legismertebb kutatója fogalmazta meg a memória kialakulásának kétlépcsős modelljét.

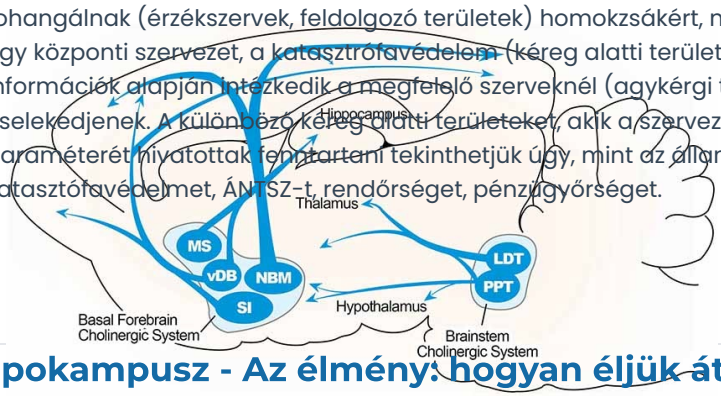


Az ábra bal oldalán a felderítő patkány hippokampuszának aktivitása látható (fekete görbe, théta hullám). A színes vonalak egy-egy multimodális elemekből összerakódó szituációban bekapcsoló idegsejt tüzelését (aktivitását) mutatják. Amikor valami fontos történik, az állat megáll (jobb oldal) és hippokampuszában egy éleshullám (sharp-wave) nevű aktivitás jelenik meg (fekete görbe). Ez alatt a korábbi szituációkban aktív idegsejtek újra aktiválódnak és a közelmúlt élményei időben tömörítve visszajátszódnak. Ezek a mintázatok eljutnak a különböző asszociációs és modális kérgekbe, hogy mint hossszútávú emlékek rögzüljenek. Hasonló éleshullámok jelennek meg alvás alatt és nagyon fontosak az emlékek megszilárdításában. Tessék aludni!

Miközben a világban teszünk-veszünk, a hippokampuszunk rövidtávú memóriájába folyamatosan „felveszi" az élményeket, amik történnek. Ezeket csak akkor jegyzi meg (teszi át a középtávú memóriába) amikor valami fontos történik (mint a biztonsági kamera, amely csak a közelmúltat menti el, de megőrzi a felvételt, ha valami történt és elmentjük az eseményeket). Azt, hogy fontos történik, más agyi területek jelzik számára (pl. az aggódó amigdala vagy a mediális szeptum nevezetű terület). Pontosabban nem csak a hippokampusz, hanem az egész agy számára jelzik, hiszen, ha valami fontos történik arra sok helyen kell reagálni. Az ilyen egész agyat érintő események bekövetkeztét a kérgi területek a megfelelő riadó-típusért felelős kéreg alatti területre küldik, akik ezeket kiértékelik és az agykérget behálózó moduláló átvivőanyagokat felszabadító axonvégződéseiken keresztül az agykérget a megfelelő válaszra bírják.

Ha árad a Duna vagy komolyabb szerencsétlenség történik, akkor nem a polgárok

rohangálnak (érzékszervek, feldolgozó területek) homokzsákért, mentőért, tűzoltóért, hanem egy központi szervezet, a katasztrófavédelem (kéreg alatti terület) a hozzá befutott információk alapján intézkedik a megfelelő szerveknél (agykérgi területek), hogy cselekedjenek. A különböző kéreg alatti területeket, akik a szervezet állapotának egy-egy paraméterét hivatottak fenntartani tekinthetjük úgy, mint az állam éber szervezeteit, a katasztófavédelmet, ÁNTSZ-t, rendőrséget, pénzügyőrséget.



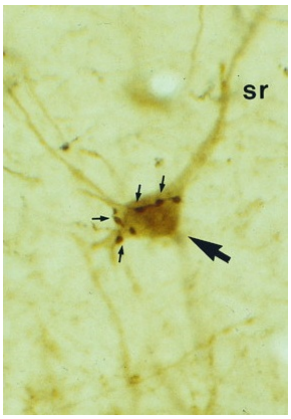
Szerző: **Gulyás Attila**

Hippokampusz - Az élmény: hogyan éljük át a pillanatot és mit tanuljunk meg II

A hippokampusz és az agykéreg működési módjainak szabályozásában fontos sok kéregalatti területről felszálló renszerek egyikének, az acetil kolin tartlamú pályáknak a lefutása. A mediális szeptális területről a hippokampuszba futó pálya tájékoztatja a hippokampuszt arról, hogy valami fontos történik. A pályában nem csak acetil-kolint, hanem GABAt tartalmazó rostok is futnak.

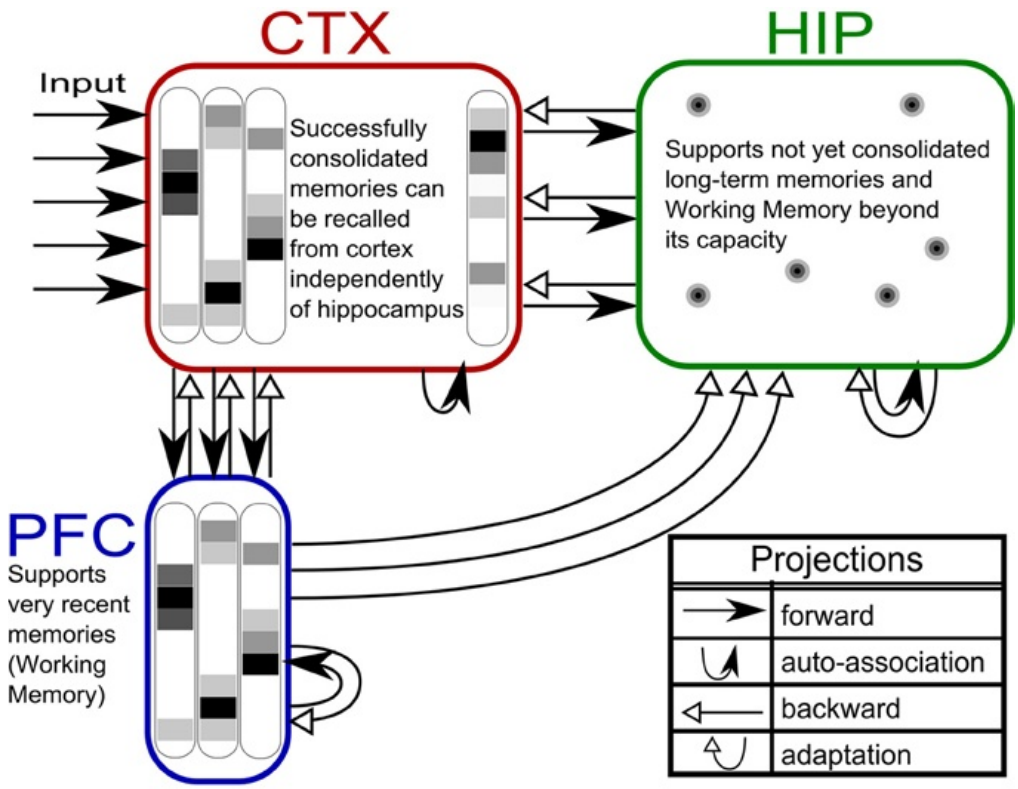
Ott tartottunk, hogy a hippokampusz jeleket kap arról mi a fontos, mi kerüljön a memóriába.

A hippokampusz történetesen a mediális szeptum nevezetű agyterülettől kap híreket arról, hogy most történt valami fontos, most kell tanulni. Erről a területről egy összetett pályarendszer érkezik a hippokampuszba. A rostok egy része GABA, a gátló transzmitter segítségével gátlás alá helyezi a hippokampusz gátlósejtjeit. Ezáltal, a gátlás gátlásával megnöveli a serkentő sejtek aktivitását, akik időben sűrítve, többször is visszajátsszák a közelmúlt fontos történéseit, hogy azok mintázatai (középtávú) memóriaként rögzüljenek az agy különböző területein (lásd előző bejegyzés).



A felvétel és a visszajátszás a két fázisa a memória kialakulásának. A visszajátszás nem csak azonnal az esemény után történik meg, hanem többször az azt követő alvás alatt, ezeket a visszajátszásokat éljük meg álmokként. Ha nem alszunk nem rögzülnek, amiket tapasztaltunk a nap során. Azaz nem sokra megy az ember egy vizsga előtt áttanult éjszakával. Ami nagyon fontos, ismételnünk kell, hogy nem a hippokampusz tárolja az emléknyomok egyes részleteit, azok a megfelelő modalitású területeken tárolódnak (ezzel is hozzájárulva feldolgozás kifinomultságához, ráadásul csak a fontos különbségtételek rögzülnek). A hippokampusz az emléknyomok tárolásának irányításában és megfelelő kontextusban való előhívásában fontos. Maguk a memóriák szerteszét tárolódnak az agyban a megfelelő modalitású agyterületeken.

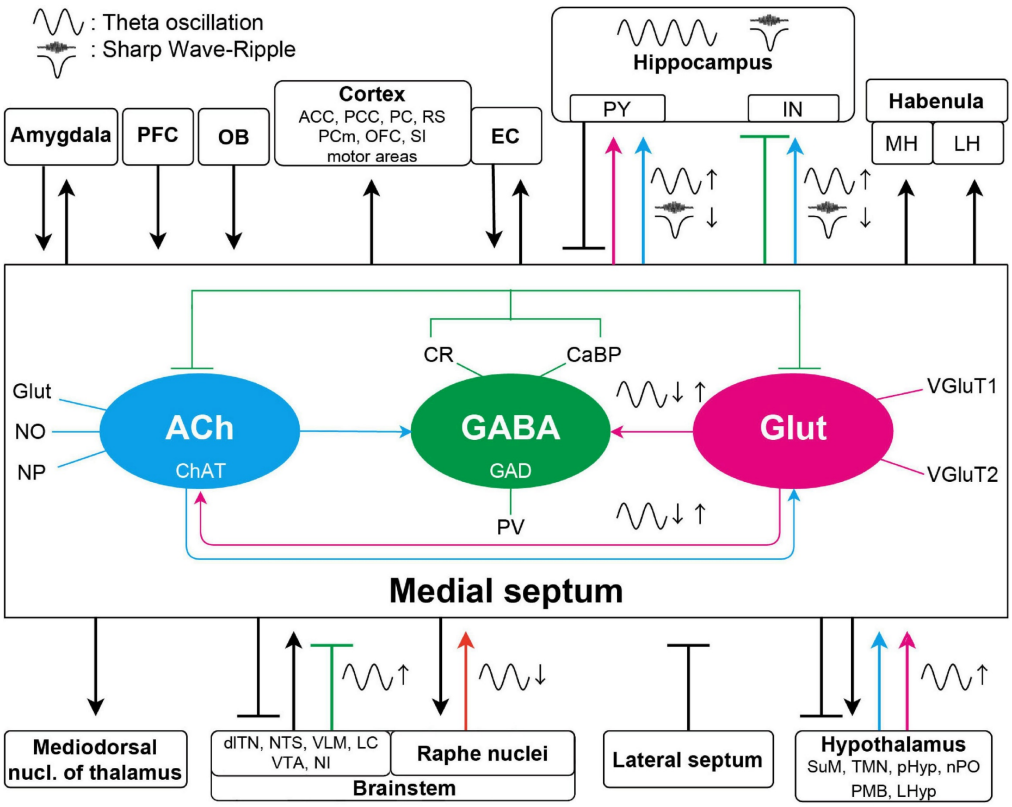
Egy barna színnel festett gátlósejt látható a hippokampuszból származó mikroszkópos felvételen. A sejtet feketével jelölt axonvégződések fonják körül, melyek a mediális szeptumból eredenek és GABA-t, gátló ingerületátvivő anyagot szabadítanak fel. A gátlósejtek gátlásával a szeptumból érkező bemenet hatására megnő a hippokampusz serkentő sejtjeinek aktivitása és tanulandó csomagokat küldenek az agykéreg megfelelő részeire.



Többféle időtartamú memória van. A PFC, a prefrontal cortex = homloklebeny rövidtávú, munka-memóriában tartjja a dolgokat. Amit éppen csinálunk, tapasztalunk, az átkerül a hippokampuszba (HIP) és ha közben fontos történt, akkor a hippokampusz élménnyé szereli össze és tárolja középtávú memóriánkban. Ezeket rögtön, illetve alvás során visszajátssza. Így rögzülnek a fontos dolgok a hosszútávú memérióba, mely szét van szórva a kölönböző modális kérgekben (CTX). Ezekből is lehet előhívni éke később (már a hippokampusz nélkül is). Innen emeli be a PFC a munkamemóriába amivel llegközelebb dolgozni fog. És a ciklus kezdődik elölről. A ciklisok ugye roppant fontosak!

Ezt a tényt a híres beteg H.M. esete mutatta be. H.M. mindkét oldali hippokampuszát el kellett távolítani huszonéves korában, gyógyszeresen kezelhetetlen erős epilepsziája miatt. Az orvosok azt vették észre, hogy H.M. megrekedt abban az életkorban amikor a műtét történt. Évtizedekkel később is, a régi dolgokra tudott emlékezni, de nem tudott újat tanulni. Úgynevezett anterográd (előre haladó) amnézia (emlékezetkiesés) alakult ki nála. Minden

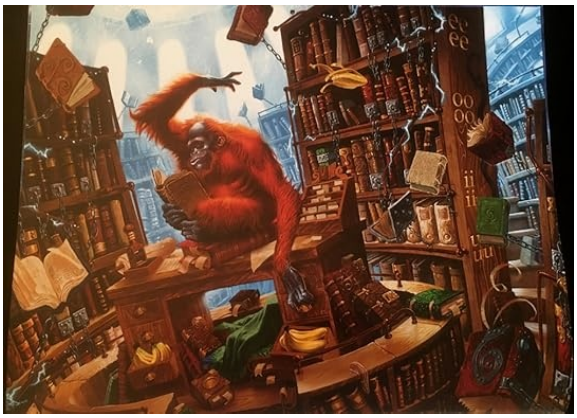
nap el kellett neki magyarázni mi történt, és hogy már nem huszonéves. Tudta ki volt az elnök a műtét előtt és amit az iskolában tanult. De a mindennapok eseményeit és tényeit képtelen volt megtanulni. Egy jó természetű, együttműködő páciens volt, a tudomány nagyon sokat köszönhet neki. Nemrég halt meg, sok helyen megemlékeztek róla a kuatók. Bár neki minden vicc új volt, nem lehetett könnyű élete. Azóta nem is távolítják el az epilepsziások mindkét oldali hippokampuszát. Egy idő után kiderült azonban, hogy a tanulás nem minden formáját vesztette el. Érzelmi tanulásra például képes volt, ugyan az Őt nap mint nap meglátogató orvosról nem tudta kicsoda és miért jött, ennek ellenére néhány hónap után már melegen, szívélyesen fogadta. Ennek oka az volt hogy bár hippkampusza és ezzel az élet-események és tények tanulása elpusztult, amigdalája, mely az érzelmi tanulásban játszik szerepet, megmaradt és képes volt felismerni és viszonyulni az orvoshoz.



A mediális szeptum, mely meghatározza azt, hogy mikor kell tanulnunk, bonyolult kapcsolatrendszerrel rendelkezik. Szőmos agyterületről kap hírt arról mikor történik valami fontos és számos agyterületre juttatja el az információt. Olyan mint az őrparancsnok. Az őrök jelentése alapján fújat riadót, amikor is mindenki azt csinálja amit kell.

Kicsit lógva hagytuk, hogy a hippokampusznak jeleket küldő mediális szeptum honnan tudja, hogy mikor kell szólnia, itt az ideje, hogy tanuljunk. Ugye ezek az ingerek lehetnek viszonylag egyszerűek (fájdalom, ijedtség, jóérzés, éhség, jóllakottság, stressz), de lehetnek összetettek is (humor, siker, kudarc). Mindennek megfelelően a mediális szeptum (és a bazális (alapi) előagy, melynek része a szeptum) több alacsonyabb és magasabb agyterület felől kap információt. A kéreg alatti területek közül a noradrenalin tartalmú locus coeruleus az éberségi szintről; a ventrális tegmentális terület a helyzet újdonságáról és az állat stressz szintjéről; az utó és középagyi szerotonin tartalmú Raphe-magvak jutalom jelenlétéről, a motiváció erősségéről; a hipotalamusz pedig az állat hangulatáról és belső állapotáról (éhség, cirkadián ritmus, stressz) szállít információt a septum számára arról mi a fontos. De számos agykérgi terület is küld információt a mediális szeptumba. A szenzoros kérgek a környezeti változásokról, újdonságokról, az amigdala a dolgok érzelmi jelentőségéről, fontosságáról (lásd következő fejezet), a homloklebeny pedig az elérendő célok megvalósulásáról, a dolgok kifinomultabb szempontból vett fontosságáról tájékoztatja közvetve (a mediális szeptumon keresztül) a hippokampuszt. Mindezek tehát

befolyásolják mit tanuljunk meg, minek maradjon minden érzékszervi csatorna adatait tartalmazó emléknyom agyunkban.
A hippokampusz, mint egy jó könyvtáros eltesz minden fontos emléket, jót, rosszat, nem minősíti, az az amigdala dolga. Ha kell agyunk a hippokampuszhoz fordul, hogy milyen emléket hol talál meg.



Könyvtáros, a Korongvilág sorozat egyik hőse. Ez a hippokampusz dolga is. Tudni mit hol kell keresni.

Az amigdala – Az érzelmek: mitől-kitől tartsunk és mitől-kitől ne I

Az amigdala, hasonlóan a hippokampuszhoz, az előagy egyik legősibb rendszerének a szaglás köré telepedett és az érzelmeket feldolgozó limbikus rendszernek a része. Fontos a döntésekben és emocionális reakciókban. Kettőjük összjátékában az amigdala adja az érzelmi töltést (félelem, jutalom), a hippokampusz a kontextust, a helyzetet (hol, mikor, hogyan).



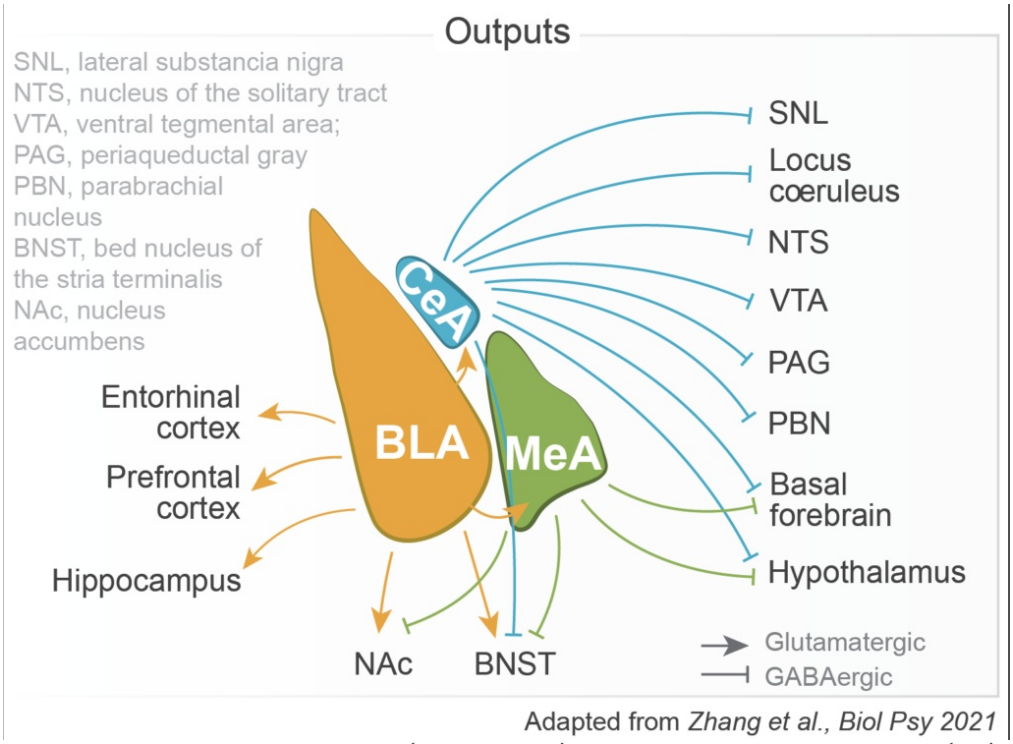
Mint a terminátor szeme, úgy izzik a képen a halántéklebeny végén a hipokampuszhoz tapadt amigdala. És igen a düh és félelem központja, de alapvetően fontos túlélésünkért, hogy megküzdjünk vagy meneküljünk ha kell.

Egy mandula alakú magcsoport, melynek egy része agykérgi, másik része törzsdúci eredetű, részei olyan viszonyban állnak egymással, mint a modern agykéreg és a törzsdúcok (striátum, globus pallidus, substancia nigra), azaz a döntések kidolgozásában együttműködnek. Vannak elsősorban bemenetet kapó és kimenetet adó magjai. A halántéklebeny felől (hasonlóan a hippokampuszhoz) információkat kap az összes érző csatorna asszociációs területeitől, de működését befolyásolják a hippokampusztól megkapott emlékek, és kordában tartják a józan homloklebenyből érkező, döntéseket, terveket, kételyeket és mérlegelések.
A hippokampusszal ellentétben az amigdala nem olyan pártatlanul néz a dolgokra. Az ő szerepe, hogy érzelmeket vigyen a dolgokba, hiszen az érzelmek alapvető jelzések túlélésünk szempontjából. Ami jó, azt csináljuk máskor is, ami rossz azt kerüljük el. Itt is kialakul egyfajta memória, érzelmi tanulás, mely a hippokampusz által összeszerelt élményeket és helyzeteket színezi meg annak függvényében, hogy amikor azokat átéltük az jó vagy rossz volt nekünk. A legősibb érzékszervünkkel a szaglással, a feromonokkal, történeti okok miatt különösen alaposan foglalkozik. Ezért maradnak meg undort vagy élvezetet keltő szagok nagyon mélyen, és ezért képesek hihetetlenül gazdag érzelmi élményeket kiváltani. Aki látta a Lecsó nevű rajzfilmet, biztos emlékszik arra, amikor a felszolgát Ratatouille illata Anton Ego-t, a kegyetlen kritikust, visszarepítetette gyerekkorába és erős érzést váltott ki benne, mert édesanyja ezzel az étellel vigasztalta egyszer.
Az agykérgi eredetű bazolaterális amigdala kölcsönös kapcsolatban áll az agykéreg többi részével (pl hippokampusz) és a bemeneteket kap a kéreg alatti területekről. Kulcsszerepet játszik az asszociatív tanulásban, az érzelemfeldolgozásban és a magasabb rendű kognitív

funkciókban.
Az amigdala kimenete a törzsdúc eredetű Centrális amigdala magokból ered. Egyrészt, az agytörzs a hipotalamusz és a mozgató rendszer felé testi reakciókat és hormonális változásokat előidéző jeleket ad. Ezek miatt áll fel a szőr a hátunkon, pirulunk el, szaladgál a hideg a hátunkon vagy izzadunk le egy pillanat alatt, amikor valami szépet vagy csúnyát tapasztalunk. Másrészt, a magasabb kérgi területek felé is küld jeleket, például a homloklebenybe, melyek hatására döntéseinkbe érzelmeink is beleszólnak. Az amigdala egy másik magpárja (cortical nucleus és medial nucles) hasonló képpen dolgoz fel információt, de itt elsősorban a szaglórendszer jelei számítanak. Mindezek eredményeképpen, ha találkozok valakivel-valamivel, az amigdala a korábban hozzá társított érzelmeket váltja ki, címkéz! De fontos az agresszióban (megelőző reakció), a



Az amigdala ha megfelelő kiváltó ingerrel találkozik, mélyen eltemetett, nagyon erős emlékeket képes előhívni (a hipppokampusz segítségével). Anton Ego-t Remy Ratatouille-ának illata gyerekkorába repítette vissza.



Az amigdala kapcsolatai. A bal oldali (narancssárga) kérgi eredetű basolateral amigdala (BLA) kapja a bemeneteket. A feldolgozott jeleket egyrészt tovább küldi (narancssárga nyilak) a kimeneneti magok (kék és zöld, central és medial amigdala), másrészt vissza az agykéreg felé. A kimeneti magok az agy kéreg alatti (magatartás) szabályozó területeire küldenek jeleket (kék és zöld vonalak).

jutalmazás és büntetésen alapuló tanulásban, az implicit (tudattalan) memóriák kialakításában (biciklizés, cipő kötés), szociális kommunikációban, testbeszéd olvasásában, szülői emóciókban, függőséggel kapcsolatos tanult emóciókban. Az amigdala kritikus a félelmi kondicionálásban. Ha egy amigdalába helyezett elektródát keresztül ingereljük annak sejtjeit a legszelídebb kisérleti állat is vaddá válik, nekitámad bárminek ami a környezetében van és sem magát, sem vélt ellenségét nem kíméli.

Folyt. köv.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az amigdala – Az érzelmek: mitől-kitől tartsunk és mitől-kitől ne II

Azzal fejeztük be, hogy az amigdala érzelmeket rendel a helyzetekhez, ezzel segíti túlélésünket. Fontos például a félelmi kondícionálában, amikor megtanuljuk azt, hogy tartsunk egy helyszíntől, történéstől.

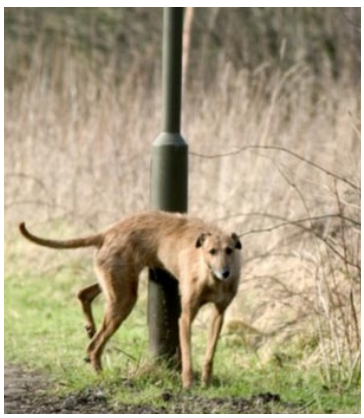


Feldühödött kutya. Amigdalája aktivitása fenye… vicsorgá…



Ha az ember megrázza az áram nagyon emlékezni fog hol történt és mit csinált. A félelmi kondícionálás nagyon hatékony.

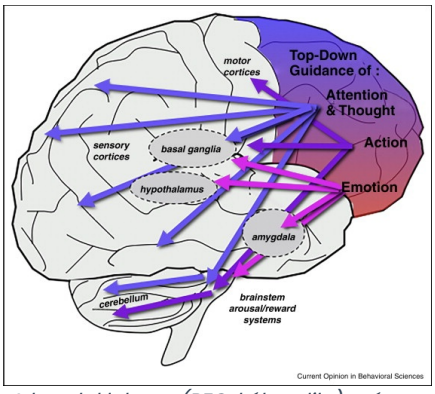
Személyes példa arról milyen erős ez. A laborban egyik napról azt tapasztaltuk, hogyha leülünk a mikroszkóp elé és belenézünk, akkor szikra csap az orrunkba, megüt minket a sztatikus elektromosság. Ettől elrántjuk a fejünket és még az orrnyergünket is jól beleütjük a szemlencsébe. Hamar megtanultuk, hogy mielőtt a mikroszkópba nézünk tegyük rá kezünket annak fém keretére, hogy kisüssük a felhalmozódott töltéseket. Egy idő után rájöttünk, hogy a takarítónő új típusú tisztítószert használt felmosáshoz, és ettől a műanyag padló nem vezette el a járáskor felhalmozódott töltéseket. Az orrunk hegyén keresztül távozott, amikor a mikroszkópba néztünk. Ezután még orrnyergünket is beütöttük. Mind a kettő fájdalmas, azaz aktiválja az amigdalát, az jelet küld a szeptumon keresztül a hippokampuszba, hogy figyelj ide! valami kellemetlen történt! mondd meg mi volt a kontextus! A hippokampusz megmondta, hogy épp a mikroszkóphoz ültünk le. Ezek után mindketten tanultak. A hippokampusz megcímkézte, hogy ez egy fontos helyzet és eltárolta a részleteit, az amigdala pedig ehhez a helyzethez hozzácsatolta az orrbacsapást. Ez a félelmi kondícionálás hihetetlenül hatékony. Kísérleti állatokban egyetlen esemény után hosszan tartó emléke maradt annak, hogy pl. ide nem megyünk, ilyet nem csinálunk. Barátom kutyája egyszer lepisilt egy utcai lámpát, ami nagyon megrázta, hiszen a sós vizelet jó vezető. Attól fogva a jószág élete hátralevő részéig nem volt hajlandó 5 méternél közelebb menni egy lámpához. Bennünk is megmaradt a „tanítás”, a tisztítószer lecserélése megszüntette a szikrákat, de bár több évtized tellt el az eset óta, én még most is mindig megérintem a mikroszkópot mielőtt belenézek.



Ez a kutya se pisilne mégegyszer lámpaoszlopra, ha megrázná az áram. Amigdalája segítene neki megjegyezni a helyzetet.

Ha elromlik az amigdala és a hippokampusz közötti kommunikáció akkor annak komoly következményei vannak: PTSD vagy szorongás-depresszió alakulhat ki. Az előbbinél ártalmatlan helyzetekben is beindulnak a félelmi/agresszió válaszok, az utóbbiban az érzelmi reakciók (negatív) folyamatosan megjelennek.
De az amigdala és a homloklebeny is állandó birkózásban van, melynek eredménye fontos reakcióinkban és döntéseinkben. Az ősi, reakcióinkat alapvetően meghatározó, gyermeki amigdala, az elmúlt, mondjuk 30 millió évben kapott maga fölé egy felnőtten érvelő,

összetett, magasabban képzett társat a homloklebeny formájában. A homloklebeny megpróbálja féken tartani az amigdalát, az amigdalának ez persze nem tetszik. Ő is beleszól a homloklebeny döntéseibe, amit a bölcs homloklebeny figyelembe is vesz. Amikor egy gyermek megszületik és elkezdi felépíteni agyát, ebben az amigdalája nagyon sokat segíti, életfontosságú. Mi fáj, mitől féljünk, mit szeressünk, kihez bújjunk? De ezek azért egy kisállatt érzelmei. A bölcsőde, az óvoda és az általános iskola arról szól, hogy sok kicsi, önző és vad, amigdalája által irányított élőlénynek megtanítsuk, hogyan kell társadalomban, empatikusan, figyelmesen és óvatosan élni. Jó, ha Pistike még gyerekkorában megtanulja nem széklábbal kell szétverni Petike fejét, ha az véletlenül ledönti a kockatornyát (vagy akár szándékosan, hiszen neki is még az amigdalája uralkodik). Ebben a fontos tanulásban fejlődő homloklebenye (és az óvónénik, szülők jól elhelyezett dicsérete, szigora) segíti. Mire felnőttek leszünk, sokunk esetében néha sikerül a homloklebenynek az amigdala fölé kerekednie, de nem mindig. A gyermek és a felnőtt kor között ott van ugye a viharos kamaszkor, amikor is agyunk „átalakítás miatt zárva". Mint mikor a hernyó bebábozódi, teste lebomlik és lepke lesz belőle. A kamaszok azért önveszélyesek, mert az amigdalájuk és motivációik hamarabb kezd felnőtté válni, mint a mérsékletet és józanságot adó homloklebeny.



A homloklebeny (PFC, kékes-lila) számos agyterületre fejt ki hatást. A figyelem, mérlegelés, kétely, önmérséklet elemeit olvasztja be döntéseinkbe. Egyik legfontosabb célterülete az amigdala, mérsékli annak erős érzelmeket okozó hatását.



Gyakorlott meditálókban csökken az amigdala aktiválódása. Agyuk felnő.

Talán már máshol is előjött, hogy rendszeresen meditálok. Az alap gyakorlat a mindfulness, tudatos jelenlét. Ennek lényege, hogy megpróbálok a jelenre figyelni, a lélegzésemre, végig pásztázom a testemet vagy figyelek a külső eseményekre. Mindehhez az kell, hogy a zavaró gondolatokat kikapcsoljam. Ez ugye nagyon nehéz, mindig bejön valami gondolat, ami elvonja a figyelmemet. Azt mondják a bölcsek, hogy nem elkergetni, ellenállni kell egy gondolatnak, hanem megfigyelni, hogy ébred, megvizsgálni tartalmát, majd hagyni, hogy tovább álljon. Nos szerintem ez a meditálás lényege, hogy megvizsgáljuk a gondolatainkat, képesek legyünk tudatában lenni annak, amikor egy gondolat felmerül. A meditálás egyik célja, hogy midig képesek legyünk a megjelenő gondolatokat kívülről, érzelmek nélkül megvizsgálni. Kellő gyakorlás után az ember képes arra, hogy egy környezetéből érkező ingert megvizsgáljon mielőtt beengedi tudatába. Tudomásul veszi, de nem vált ki benne

érzelmeket. Én ezt úgy fogalmaztam meg, hogy egy tűzfalat építek a külvilág és az elmém közé. Csak azt engedem be, amit szeretnék. A tippem az volt, hogy valószínűleg a meditációs gyakorlatok alatt megtanuljuk, hogy a homloklebenyünk kikapcsolja az amigdalát. Mivel ezt csak művelt találgatásnak tartottam utánanéztem a szakirodalomban, és valóban gyakorlott meditálók esetében meditálás alatt (de kisebb mértékben a mindennapokban is) az amigdala aktivitása csökken. BINGO!.

Mondhatjuk talán azt, hogy amigdala vezérelt gyermeki agyunk akkor lesz igazán felnőtt, amikor meditálni kezdünk és az amigdala hatását mind jobban visszaszorítjuk.

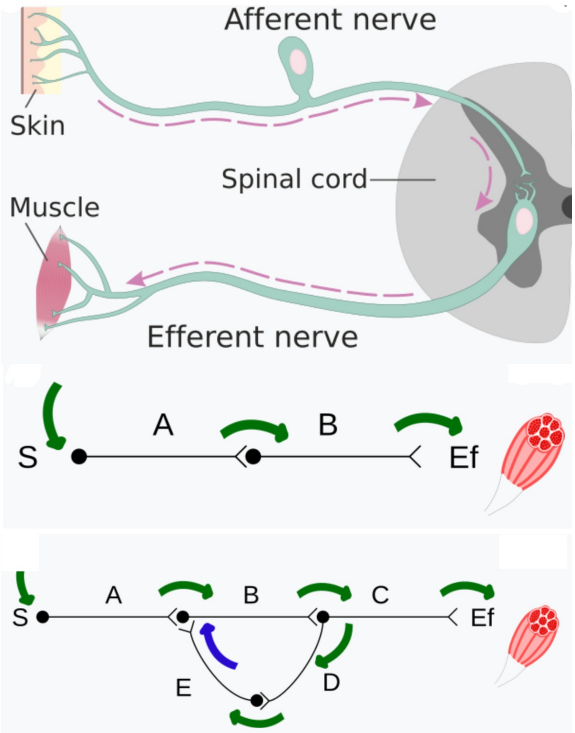
A következőkben majd a Rongy Elek a példakép, tökéletes homloklebenyről is lesz szó, de előtte még fel kell vázolnunk, hogyan is alakult ki a gondolkodás, tervezés, hiszen eddig csak az érzékelésről beszéltünk.

Szerző: **Gulyás Attila**

A válasz megtervezésének hierarchiája: A jelfeldolgozás és a válasz kapcsolódása

Ezidáig az érzékelésről, az ingerfeldolgozásról beszéltünk. A fent vázolt lépéseken (elsődleges, másodlagos modális, multimodális asszociációs kérgek) keresztül dolgozódnak fel a külvilág információi, az agy bemenetei. De az agyi feldolgozásnak ugye van egy másik ága is, a válasz, a mozgatás, tervezés, és gondolkodás ága, az agy kimenete.

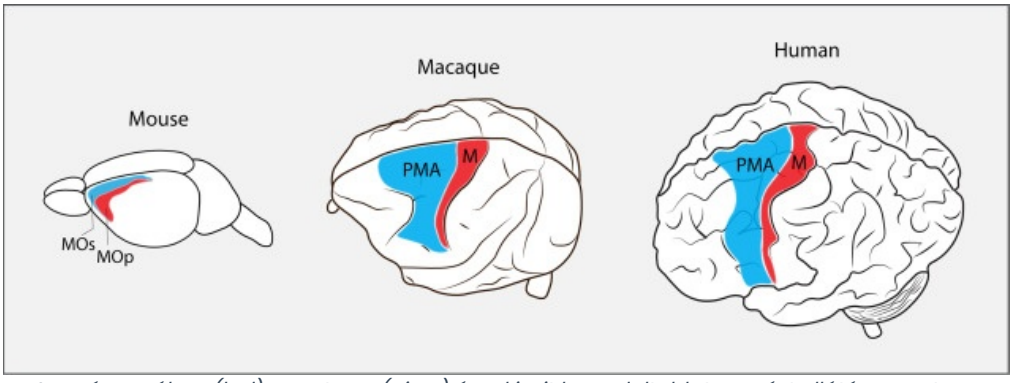
Hiszen az idegrendszerek azért fejlődtek, hogy választ adjanak a környezet ingereire, a bementre kimenettel reagáljanak és elősegítség az élőlény túlélését. Az agy a csalánozók egyszerű reflexíveiből fejlődött: az érzéksejt, interneuron, mozgató sejt láncolat bokrosodott meg egy sokkal hatékonyabb döntésre képes aggyá, melyben az érző ág fent leírt feldolgozó hierarchiája belefut a mozgató ágba, a válasz megtervezésének hierarchiájába. Az egyszerűbb agyakban, például a rágcsálókban, a választ adó mozgató kéreg közvetlenül az érző kéreg mellett van. Ahogy finomodott az érzékszervi ingerek feldolgozása a másodlagos és asszociációs érző területek kialakulásával a válasz kidolgozása is finomodott. Mint ahogy az elsődleges látókéreg mellett megjelentek további látás feldolgozó kérgek, az elsődleges mozgató kéregtől előre megjelent a másodlagos, majd a járulékos (supplementary) motor kéreg is. Később ezek előtt kialakult a



Az ábra felső részén legegyszerűbb reflexívünk látszik. A reflex érző ágán beérkező inger átkapcsol a gerincvelőben és a mozató ág útján mozgást vált ki. Középen ugyanennek az ívnek a sémás rajza látható (S: sensory, érző ág, Ef: effector: végrehajtó ág). Az A idegsejt átadja a jelet a B-nek. Itt még egy ösztönös merev válasz lehetséges csak, mely mindig ugyanúgy

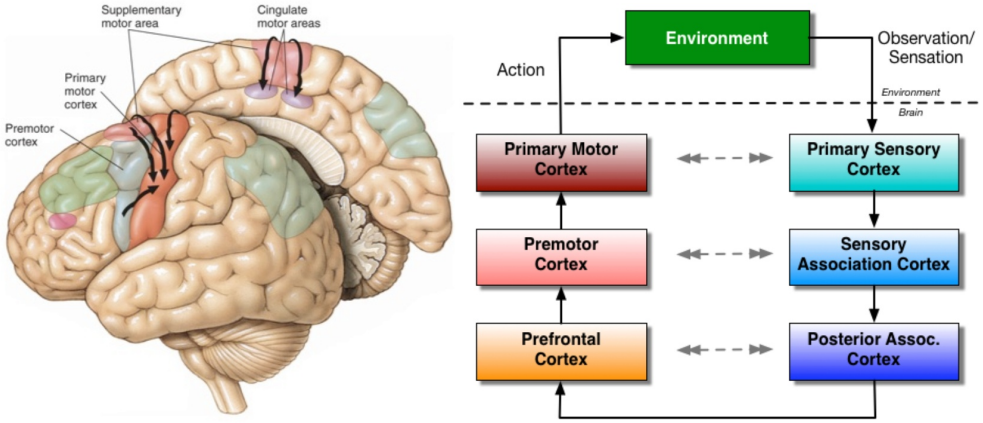
homloklebeny, amire mi emberek oly büszkék vagyunk, mert csak nekünk van, és ettől nem csapott a homlokunk.

zajlik le. Alul egy összetetteb reflexív látszik, ahol az A és C sejt közé B, D és E sejtek épültek be, az interneuronok. Az agy karrierje során a sejtek és a rétegek száma nőtt meg robbanás szerűen. Az egyes feldolgozó lépések, elsődleges, másodlagos és asszociációs agykérgi területek tekinthetők egymásra épült interneuronok (tkapcsoló sejtek) halmazainak.



Az egér agyában (bal) a motoros (piros) és a kicsit bonyolultabb tervezést ellátó premotoros (kék) kéreg található csak a tesstérző kéreg előtt. A főemlősükben (középen), majd az emberben (jobb) egyre több tervezésre specializálódott kéregterület jelenik meg ezek előtt. Homlokunk a legmagassab szintű tervezésért felelős homloklebeny kialakulása miatt domború.

A fejlettebb agyakban, ahogy az érzékelés hierarchiája a multimodális asszociációs kérgekben végződik (érzőág), úgy a magasabb rendű válasz tervezés hierarchiája is a magasabb rendű asszociációs kérgekből indul ki (mozgató ág). Elsősorban a homloklebenyből, de egyszerűbb, gyors beavatkozást igénylő esetekben például az amigdalából.

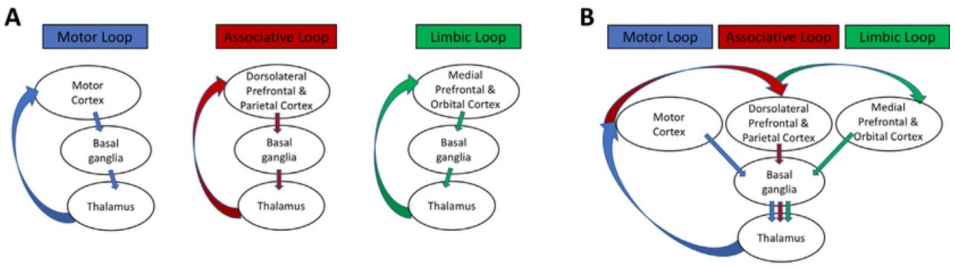


Baloldalt az emberi motors kérgek láthatók, tőlük balra (előre) található a legmagasabb tervező terület a homloklebeny (nincs színezve). Jobb oldalt az érző-motoros feldolgozás hierarhiája látható sematikus formában.

Miközben kialakultak az elvontabb reprezentációkat használó absztraktabb tervezéseket végző kérgi területek ezek már nem csak mozdulatokat, hanem szándékokat, gondolatokat is elkezdtek tervezni. Nagyon fontos! Gondolataink mozdulataink absztrakciói. Gondolkodásunk ugyanazokra az agyi tervező rendszerekre épült rá, amelyek a mozgás megtervezését végezték (erről hamarosan részletesen).

Egy személyes történet döbbentett rá erre. Legkisebb fiam amikor megszületett, az

izmai, egész teste merev volt, feszült mindene. Napokon belül elvittem egy gyógytornász ismerősömhöz, aki megvizsgálta és azt mondta, hogy azonnal, heti kétszer masszázst és gyógytornát kell kapjon féléves koráig. Miközben az apróságot a Dévény módszer néha igen kellemetlen fogásaival ingerelte, gyúrta, sokat beszélgettünk. Mondta, hogy milyen jó, hogy ilyen kis korban észrevettük ezt, mert a merev gyerekeken elmaradnak a természet mozgásfejlődés lépcsői, a kúszás, a mászás, a bal-jobb oldal alternált mozgás kialakulása, az oldalak függetlenedése. Emiatt rosszul érik az idegrendszerük és ez később kognitív problémákat okoz. A merev gyerekek később gyakran dislexiások lehetnek például. A tornával és a masszázzsal a be nem indult reflexet indította és a megrekedteket leépítette.



A) A mozgástervezés (bal), a gondolkodás (közép) és az érzelmi reakciók (jobb) tervezési hurkai. Ugyanazokat az agyi rendszereket használják. B) A három ág egy ábrán ábrázolva.

Ekkor a homlokomra csaptam, hogy hát persze!!!! Homloklebenyünk a gondolkodás során ugyanazokat a striátum-talamusz-kisagy köröket használja, mint a emotoros rendszer mozgástervezése. Ugye az agyban minden sejtaktivitás mintázatok fejlődése egy mozdulatot ugyanúgy tervezünk meg, mint egy szándékot, egy tervet, egy matematikai feladatot. Összevetjük a lehetőségeket és kiválasztjuk, amit a jelenlegi belső és külső állapot megenged. Ha a gyermekben elmarad az agykéreg-striátum-talamusz kör helyes felépülése, akkor a gondolkodásával is bajok lesznek. A dolog jól végződött a fejlesztésnek hála a fiatalember mostanra már kiváló sportoló, elsőosztályú jégkorong játékos.
Később az is leesett, hogy életünk másik végén, idős korunkban hasonló összefüggés van a mozgás tervezés és a gondolatok között. Az idős kori Parkinson kór az agyi dopamin sejtek pusztulásának következménye. Ennek hatására a striátumba nem érkezik meg az a dopamin jel, ami szükséges a mozgástervezéshez. A Parkinson kóros azért remeg, majd később merev, mert agya nem tudja kiválasztani a sok mozgásterv közül azt amelyiket végre kellene hajtania. Az egyszerre induló, gyakran ellentétes mozgások, remegésként jelennek meg. Amikor aztán nagyon sok mozgás verseng egyszerre a beteg merev lesz. Kicsit olyan ez, mint amikor a macska ráfekszik a számítógép billentyűzetre, vagy ráülünk a TV távirányítójára. Eszement értelmezhetetlen villogások az eredmény. Sajnos az idős korú döntéshozók között gyakran vannak Parkinson kórban szenvedők. A dologban az a megrázó, hogy egy Parkinson kórosnak nem csak a keze, de a gondolatai is remegnek!

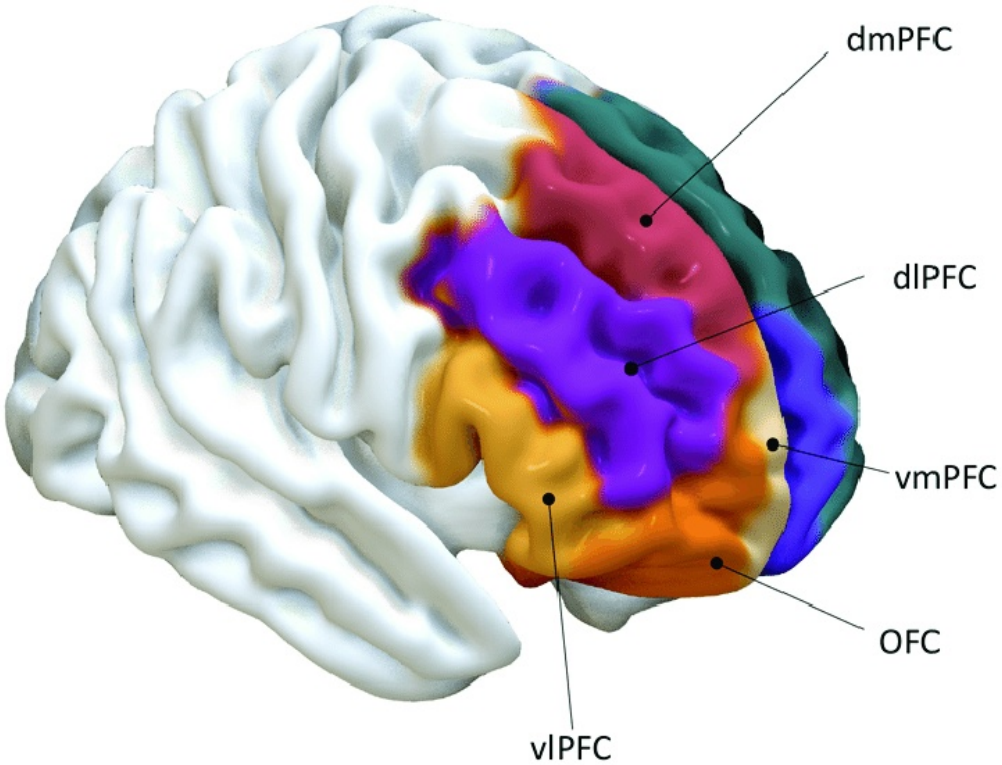
A mozgástervezés részleteiről majd beszélünk még. A következő bejegyzésben azt nézzük meg, mit is csinál az evolúciósan legújabb és a tudatosságot erősen meghatározó legmagasabb szintű multimodális kéreg a homloklebeny.

Szerző: **Gulyás Attila**

A homloklebeny funkciói

A harmadiknak tárgyalásra kerülő multimodális asszociációs terület, a homloklebeny,

agyunk legújabb szerzeménye, mint tárgyaltuk az egyre absztraktabb mozgástervezést végző mozgató kérgekből, azoktól előre fele fejődött. Alapvető jelentőségű új, elsősorban az emberre jellemző képességeket adott nekünk.



A homloklebeny, prefrontal cortex (PFC) területei.

Az agykéreg eddig tárgyalt, érzékszervekhez kapcsolódó részei, passzívak, a külvilág ingereit dolgozzák fel és reagálnak rájuk, működésük a reflexre hasonlít. Inger – válasz. Csak a jelen határozza meg működésüket, csak a jelen létezik számukra. A homloklebeny azáltal, hogy magasabb szintre emelte az absztrakciót - a mozgató kéreg mozdulat tervezésből gondolkodás lett - függetlenítette a válasz megtervezését az aktuális ingerektől.



A homloklebeny végrehajtó funkciói (executive functions). Gyengécske magyar fordításban, de itt tart még az AI.

Homloklebenyünk mintázatai a külvilággal egyenértékű ingereknek számítanak a feladatmegoldás során. Ezért nem feltétlenül csak akkor teszünk valamit, amikor külső inger ér minket, hanem agyunk belső állapota is indíthat feldolgozást, majd esetenként cselekvést (ez persze valamilyen szinten már megvolt korábban is, hiszen tavasszal a hormonok hatására az állatok fészket kezdenek rakni és párt keresni, de ezek még bezsinórozott ösztönök, bizonyos programok futtatódnak). **A homloklebeny** ezen belső állapotai, késztetései **miatt megjelent gondolkodásunkban a jövő, és a múlt, korábbi tapasztalatinkat felhasználva tervezünk, megvalósítjuk belső motivációinkat.** Ehhez homloklebenyünk szabályokat tanul és alkalmaz, mérlegel, kételkedik.

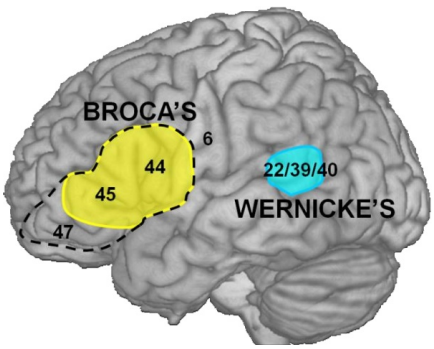
A homloklebeny felelős a **végrehajtó funkciók**ért (executive functions), melyek: **tervezés és célkitűzés, problémamegoldás, rugalmas gondolkodás, figyelem és munkamemória szabályozása, döntéshozatal.** Ezen kívül fontos a mozgás irányításban: az elsődleges motoros kérget (M1) irányítva a tudatos mozgások kivitelezéséért felelős, a premotoros



A homloklebeny funkciói, kicsit suta AI fordításban. A homloklebeny, mivel meghatározó a viselkedés tervezésében értelem szerűen erősen kapcsolódik a limbikus rendszerhez. Az övtekervény (gyrus cinguli) elülsé területeinek (ACC) szerepét a homloklebeny többi részének működésével szokták együtt tárgyalni, mert szorosan együttműködnek.

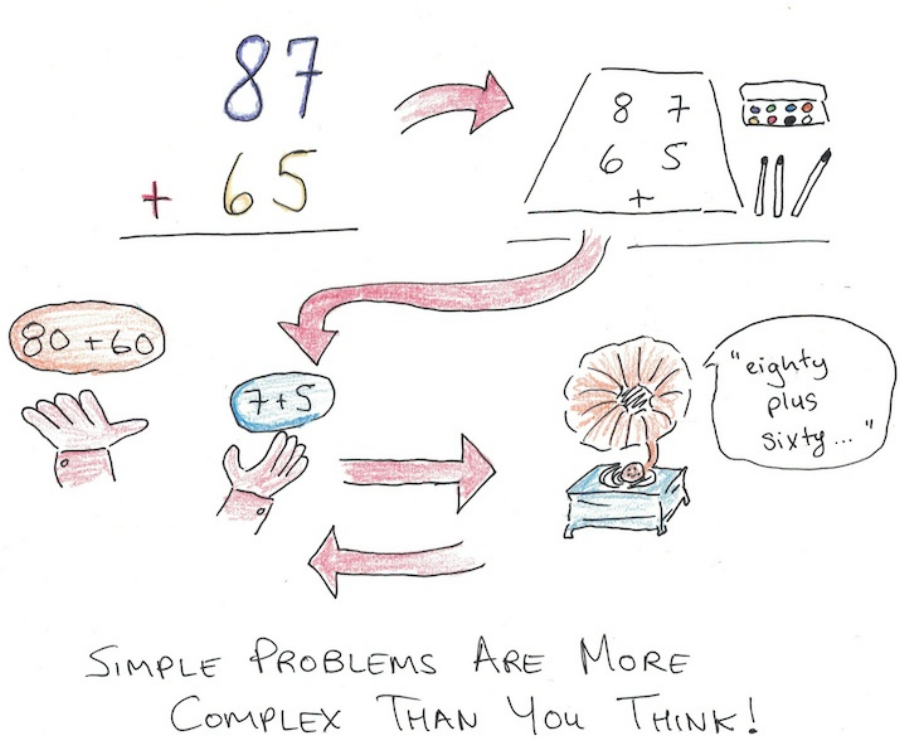
kéreg és a kiegészítő motoros területet irányítva a mozgástervezést és a komplex mozdulatsorok kivitelezését segítik. De részt vesz a viselkedésszabályozásban és az impulzus kontrollban is, azaz: gátolja a szociálisan nem megfelelő viselkedéseket (amigdalát csitítgatja), **fontos az önszabályozában és az érzelmek ellenőrzésében, a döntések hosszú távú következményeinek mérlegelésében** (megfontolt). Feladata még a szociális és érzelmi feldolgozás: **empátia és társas viselkedés szabályozása, érzelmek felismerése és kezelése.** A limbikus rendszerrel (pl. amigdala) való kapcsolat révén **az érzelmi válaszokat finomítja.**

És nem utolsó sorban, az absztrakció képessége miatt fontos a **nyelvi funkciókban: a Broca-terület** (mely a bal homloklebenyben található) a beszédhez szükséges, fontos a szavak megtalálásában és a nyelvtani szerkezetek kialakításában.



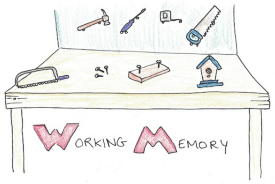
A beszéd előállításában fontos Broca területet homloklebeny bal 44 és 45 Brodman féle területei alkotják.

Legkifinomultabb funkciója, hogy az **ellentmondásos gondolatok összevetésében** és feloldásában fontos, **mérlegel** mi a jó a rossz, a jobb és a rosszabb, mi ugyanaz vagy különböző, mi lesz a jövőbeli következménye jelenlegi cselekedeteinknek (ezt azért valljuk be soka nem gondolják át), **kiértékeli a kockázatokat,** mit várunk el egy-egy lehetséges cselekedetünkre, megnézi hogyan érünk el egy távoli célt (**tervezés**), hogyan kell társas helyzetekben viselkedni.



A homloklebeny elemi lépésekre bont fel egy feladatot (algoritmust készít) és ezeket átadja megoldásra az egyes szakosodott feladatmegoldó agykérgeknek.

Végül úgy tűnik itt székel, amire oly büszkék vagyunk, a **logikus gondolkodás,** melynek során egymás utáni elemekre bontja a problémát és az elemi feladatokat elküldi az egyes agyterületeknek feldolgozásra.



A munkamemóriába kerülek egy feladat megoldásához szükséges elemek. Ezekkel végez azután műveleteket a homloklebeny. Mint ahogy az asztalos elhelyezi munkapadján az összeállítandó tárgyakat. Nagyobb asztalon bonyolultabb dolgokat lehet összerakni.

A homloklebeny egyik legfontosabb újítása a munkamemória megjelenése volt, mely lehetővé teszi, hogy ne csak az aktuális beérkező ingerekre válaszoljunk rutin-szerűen, hanem számos tényezőt figyeleme véve mérlegeljünk, kételkedjünk, szándékaink és tartós motivációink legyenek. **A munkamemóriába kerülő fogalmakkal vagyunk képesek dolgozni, azokon szabályokat alkalmazni, összevetni elemeit, hogy összeáll-e belőlük egy újabb megoldás, vagy esetleg a tények ellentmondanak egymásnak.** Számítástechnikában járatosak számára: a munkamemória olyan, mint a processzor regiszterei, melyekben elhelyezett adatokkal a processzor műveleteket tud végezni. Kevésbé rétegízlés példával, hasonló az asztalos munkapadjához, amin a felhelyezett bútor alkatrészek kerülnek összeszerelésre a mester által, a megfelelő szerszámokat (szabályokat) használva. Minél több rekeszes munkamemóriánk, minél több „tárgyat" tud a mester manipulálni, annál bonyolultabb dolgokat tudunk végiggondolni, bonyolultabb tárgyakat összeszerelni. Úgy tűnik a munkamemória mérete (rekeszeinek száma) erősen meghatározza az intelligenciát. Az IQ tesztek leginkább azt nézik milyen módon és hány elemet tudunk kombinálni és milyen kombinációs szabályok között tudunk váltani. Nagyobb munkapadon bonyolultabb dolgokat lehet összeszerelni, még ha ugyanazokat a szerszámokat is használjuk.

A munkamemória és rövidtávú memória között időnként elmossák a különbséget, de ez

nem teljesen helyes. A munkamemóriának egy eleme a rövidtávú tároló memória. Maga a munkamemória a tároló és műveleteket (manipuációkat) végző részek együttese. A munkamemóriával kapcsolatban jön elő a sokat emlegetett 7-es szám. Egy átlagember ennyi dolgot tud megjegyezni és azokkal műveleteket végezni (sorba rendezni, visszafele visszamondani, megkeresni a kakukktojást). .



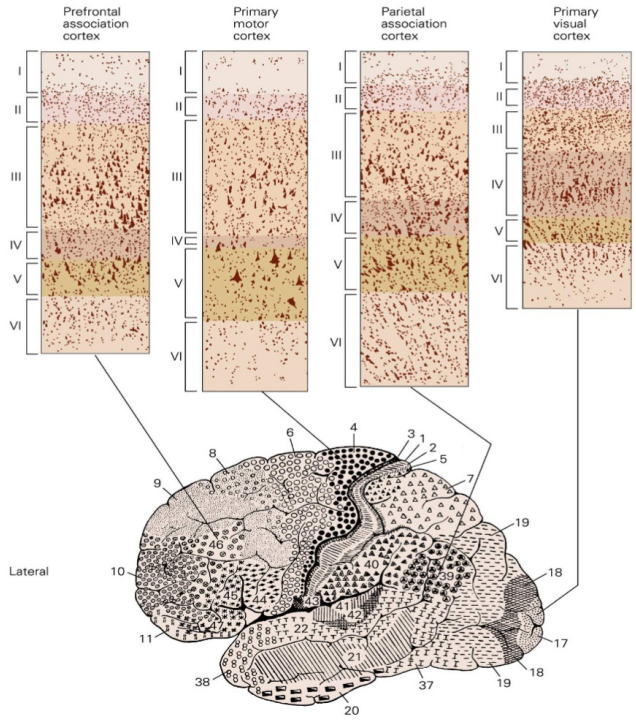
A munkamemória és a tároló memória viszonya.

Folyt. köv., arról, hogy hol mi történik a homloklebenyben.

Szerző: **Gulyás Attila**

A homloklebeny szerveződése

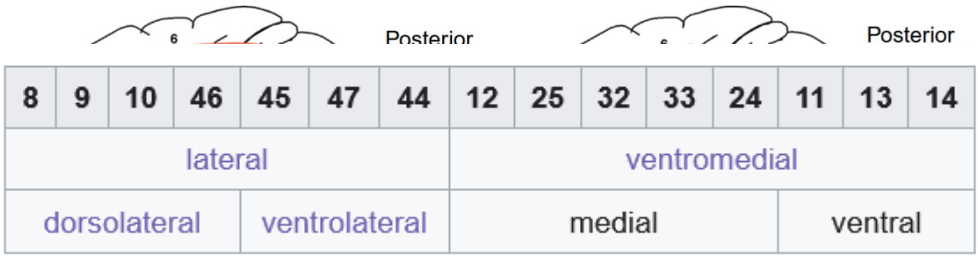
Alant vegyük át kicsit részletesebben a homloklebeny, a prefrontális cortex (PFC) anatómiáját és felosztását, mert egyes területei más-más feladatok ellátására specializálódtak



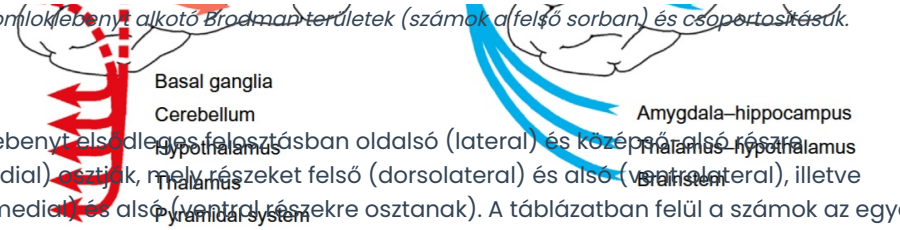
A homloklebeny asszociásiós kéreg típusba tartozó területének (bal) sejtrétegei. Az érző kérgekhez hasonlóan itt is megtalálható a talamusz felől bemeneteket fogadó IV. réteg, de itt a III. réteg a legvastagabb, mely az agykérgi területek közötti információcsere rétege.

Annak ellenére, hogy a mozgató kéregből fejlődött meghatározó jellegzetessége, hogy jelen van benne a szemcsés IV. réteg, mely az érző kérgekben a kéreg alulról jövő bemeneteit fogadó réteg (ami ugye a kimenetet adó motoros kérgekben nincs jelen, ott az V.-VI. réteg vastagodott meg). Meghatározó kapcsolatrendszere még, hogy a mediodorsal (középső hátsó) talamusz maggal van kapcsolatban. Elkülönítő jellegzetessége, hogy ingerlése nem vált ki mozgásokat (hiszen csak közvetett kapcsolatban áll a mozgató kéreggel).

A PFC gazdag kapcsolatrendszert alakít ki más agykérgi, kéreg alatti és agytörzsi területekkel. Ellentétben az érző és alacsonyabb asszociációs területekkel, kapcsolatai gyakran egyirányúak, nem kölcsönösek, úgy tűnik itt nincs szükség visszacsatolási hurkokra. Jeleket kap az agytörzsi ébresztő (arousal) rendszertől, melyen keresztül éberségi szintünk befolyásolja mentális állapotunkat. Fontos kapcsolata van az amigdalával, melynek aktivitását képes gátolni. A homloklebeny károsodása, kísérleti állatokban fokozott félelmet okoz, ragadozóktól, idegen helyzetektől, mivel amigdalájuk aktivitása megnő.

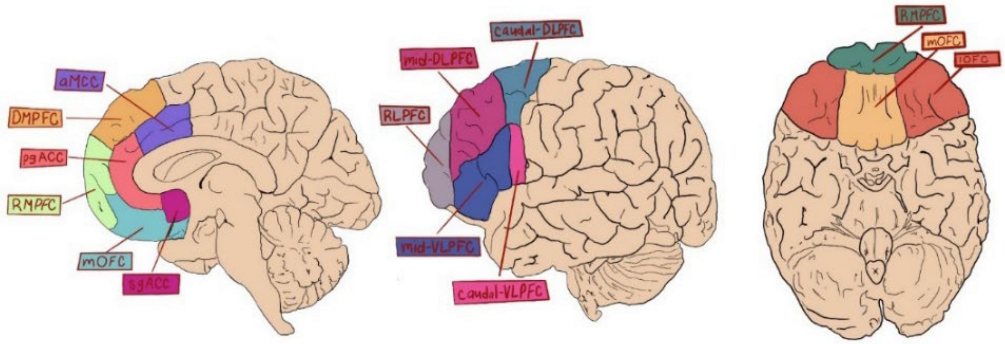


A homloklebenyt alkotó Brodman-területek (számok a felső sorban) és csoportosításuk.



A homloklebenyt elsődleges felosztásban oldalsó (lateral) és középső-alsó részre (ventromedial) osztják, mely részeket felső (dorsolateral) és alsó (ventrolateral), illetve középső (medial) és alsó (ventral részekre osztanak). A táblázatban felül a számok az egyes alterületekre (és Brodman-területekre) utalnak.

A PFC területei és Brodman-területek közötti kapcsolatok. Nagyon sokszor egy területről kapott információ visszaküldése nem feltétlenül kétirányúak, mint az érző feldolgozó hierarchia esetében.

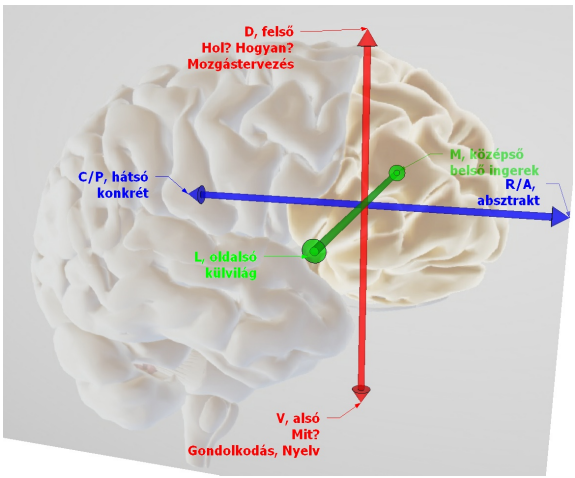


A bal oldalon a középsíkban elvágott agy a középső irányba (medialis) néző PFC területeket mutatja. A középső rajz az oldalra (lateralis) a koponyatető felé néző területeket, a jobb oldali, pedig alulról mutatja az alsó (ventralis) felszínen a PFC alterületeket. Oldalra néz a DLPF és VLPFC, a felső-oldalsó (dorso-lateral) és az alsó oldalsó (ventro-lateral) PFC. Középre a felső-középső (dorso-medial) DMPFC. További tagolásban használják még a rostral (R), azaz orr irányú, első és a caudal, azaz farok irányú, hátsó előtagokat is. OFC orbito-frontal coretexet, azaz a szemgolyó fölötti elülső kérget jelenti. Az ACC pedig az anterior cyngulate cortex, azaz a limbikus rendszerhez tartozó övtekervény első részének rövidítése.

A homloklebeny oldalsó, az agy **felszíne felé néző területei a külvilágra fókuszáló** feladatokat oldanak meg, mint például: figyelem, feladat megoldás, célirányos viselkedés. **A két agyfélteke közötti (mediális) és alsó (ventrális) területei belső feladatokra,** az önvizsgálatra, érzelmekre és társadalmi viszonyulásokra figyelnek.

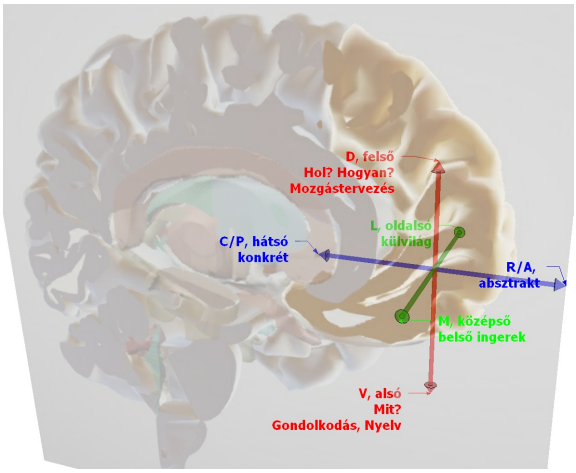
A fenti tagolás két tengelye mellett (függőleges: felső versus alsó és vízszintes: oldalsó versus-középső) mellet egy harmadik tengely mentén is (első versus hátsó) is megjelennek funkcionális eltérések. Azaz 8 kicsit eltérő feldolgozási területe bontható, mely más módon végez magasabb absztrakciójú műveleteket.

Első tengely (D-V): A látó és hallórendszerhez hasonlóan itt is felbukkan a **dorzális (felső) és ventrális (alsó) feldolgozási ág, azaz a Where?/Hol? (vagy máshogy fogalmazva How?/ Hogyan?) és a What?/Mit? feldolgozásának elválása.** A dorsal, felső területek elsősorban térbeli információkat dolgoznak fel (hol?) és a mozgás tervezésében vesznek rész (Hogyan?), mivel közelebb vannak az érző kérgekhez. A ventrális (alsó) területek (mit?) a hippokampuszhoz, a ténybeli memóriához, az emlékekhez, kategóriákhoz, tényekhez vannak közelebb, így a homloklebeny ezen része az érzelmi és gondolkodási tervezésben vesz részt.



A jobb PFC és tagolása a koponya felszíne felől nézve.

Második tengely (L-M): A laterális, oldalsó, az agy felszínén lévő területek, jobban kapcsolódnak az érzékeléshez, a külvilágból származó ingerekhez és a **hideg (cold)**, érzelem mentes feldolgozásban, gondolkodásban, beszédben jeleskednek. Míg a medial, középső, az agyféltekék találkozása felé néző területek erősebben kapcsolódnak a belső világ ingereihez. A kéreg alatti és a limbikus rendszerhez kapcsolódva, feldolgozzák az érzelmeket, a viszonyulásokat, motivációs állapotokat. Azaz a **hot (meleg)** feldolgozás a szakterületük.



A bal PFC és tagolása a jobb félteke felől nézve.

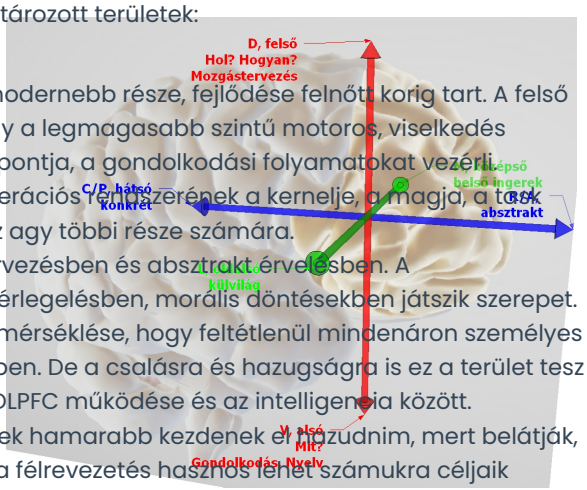
A harmadik tengely (A-P/R-C): Emlékezzünk rá, hogy a PFC a motoros kéreg előtt alakult ki lépésenként és az egyre absztraktabb feldolgozást végző területek egyre előrébb (anterior, A vagy rostral, R) helyezkednek el. Ennek megfelően az **első területek absztraktabb, a hátsóbb** (posterior, P vagy caudal, C) **területek konkrétabb dolgokkal dolgoznak.** A gondolat, elképzelés, absztarkció fokozatai vagy szabály összetettsége előre fele nő, egyre szélesebb kategóriákkal dolgozik a PFC: téglavörös, piros, szín, és egyre elvontabb fizikai tárgyakkal: naplemente - szép. A szabály összetettség esetében az növekszik, hogy hány összetevő kell a szabály alkalmazásához. Ez a bonyolódás párhuzamosan zajlik a felső (Hol?, Hogyan) és az alsó (Mit?) ágon, a DLPFC-ben, ahol a szabályok bonyolódnak és az alsó, VLPFCben ahol az absztrakció mélyül.

Szerző: **Gulyás Attila**

Hol mi történik a homloklebenyben

Nézzük meg a fenti 3 tengely alapján működésében szakosodott homloklebeny területek mit csinálnak?

A cold, hideg, külső ingerek által meghatározott területek:



A 3 funkcionális tengely a

DLPFC (BA8,9,10,46): Az emberi agy legmodernebb része, fejlődése felnőtt korig tart. A felső (dorsal) feldolgozási ág végpontja és így a legmagasabb szintű motoros, viselkedés tervezésének, a végrehajtó funkciók központja, a gondolkodási folyamatokat vezérli. Számítógépes hasonlattal Ő agyunk operációs rendszerének a kernelje, a magja, a task manager, mely a feladatokat kiosztja az agy többi része számára.
Fontos a feladatok közötti váltásban, tervezésben és absztrakt érvelésben. A kockázatbecslésben, költség-haszon mérlegelésben, morális döntésekben játszik szerepet. Innen ered az önmérséklet, azaz annak mérséklése, hogy feltétlenül mindenáron személyes haszonra tegyünk szert másokkal szemben. De a csalásra és hazugságra is ez a terület tesz képessé minket. Erős az összefüggés a DLPFC működése és az intelligencia között. Megfigyelték, hogy az intelligens gyerekek hamarabb kezdenek el hazudnim, mert belátják, hogy mások nem azt tudják amit ők és a félrevezetés hasznos lehet számukra céljaik elérésében.
Itt helyezkedik el a munkamemória, mely a fogalmakkal való műveleteket, érvelést, összehasonlítást, mérlegelést, kételkedést teszi lehetővé. Skizofréniában és depresszióban csökkent DLPFC működést lehet megfigyelni. Tartós stressz károsítja működését.
Meglepő módon alvás alatt nem működik. Károsodása a motiváció, a figyelem és a spontán akciók elvesztéséhez vezet.
A baloldali DLPFC a verbális (gondolati) feldolgozásra, a jobb a térbeli feldolgozásra szakosodott. Lásd a tudós versus művész agy esetét.

- BA8: szemmozgatás, bizonytalanság felmérése, reménykedés
- BA9: bal: empátia, idiómák, élvezetes és kellemetlen helyzetek feldolgozása, önkritika és figyelem negatív és pozitív érzelmekre. jobb: szándékokat tulajdonít másoknak, elmeteória, a szomorúság legyőzése, munka és térbeli memória, felismerés, előhívás, mások érzelmeinek felismerése, tervezés, számolás, vallásosság
- BA10: viszonylag kevésbé értett a funkciója, úgy tűnik több párhuzamosan zajló feladat esetében a feladatváltásokat irányítja és az épp nem futó feladatokat őrzi meg. Számítógépeseknek: task manager és swap terület. Talán evolúciósan nem véletlen, hogy legelöl van, azaz legutóbbi szerzeményünk, hiszen itt van a feladatkiosztás a feladata.
- BA46: figyelem fenntartása, munkamemória, önmérséklet, azon kevés agyterületek egyike, ahol REM alvásban az aktivitás csökken.

VLPFC (BA44,45,47): a ventrális, Mit? ág vége, a hippokampuszhoz és memória rendszerez kapcsolódik erősen. Erős a bal-jobb szétválás. Itt találhatók a Brodman 44 és 45 területek. A baloldali B44 fontos a hierarchikus feldolgozásban, magasab szintű agyi funkciókban, szemantikus feladatokban, a zene élvezetében. A bal BA44 és BA45 alkotja a Broca terület, mely a beszédképző kérget alkotja. De itt találhatók meg a híres tükör idegsejtek is, melyek ugyanúgy aktiválódnak amikor én csinálok valamit vagy látom, hogy mást csinál valami ugyanolyat. Ez arra utal, hogy a beszéd a gesztusok utánzásából fejlődhetett.

A jobb oldal fontos a helyzetben nem megfelelő motoros válaszok gátlásában és módosításában. No ez mi lehet? Hát például egy fogadáson megindul a kezed, hogy valami méretes fikát szedj ki az orrodból, de félúton megáll és végigsimítod a hajadat 😊. De ez az oldal hívja fel a figyelmünket arra az eseményre is, ami éppen aktuális figyelmünkön kívül van.

- A BA45 fontos még a tudatos felülről irányított memória előhívásban, az érvelésben, különösen a logikus-analitikus érvelésben.
- BA44: Broca terület része, a beszéd motoros részében fontos, de részt vesz szemantikus, azaz a jelentéssel kapcsolatos feldolgozásban is.
- BA45: szintén Broca terület, az adott helyzetben odaillő szemantikus memória (jelentés) előhívásában segíti a BA44et. Kicsit általánosítva keretek között tartja az éppen megoldandó feladatokat, választ a lehetséges forgatókönyvek közül. Károsodása a

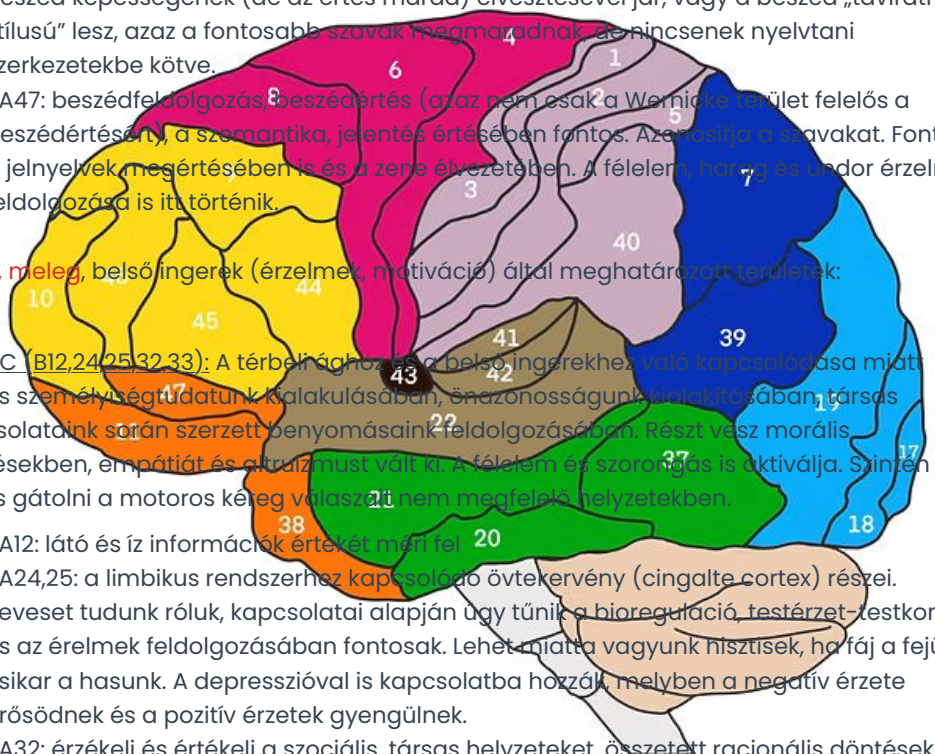
beszéd képességének (de az értés marad) elvesztésével jár, vagy a beszéd „távirati stílusú” lesz, azaz a fontosabb szavak megmaradnak, de nincsenek nyelvtani szerkezetekbe kötve.

- BA47: beszédfeldolgozás, beszédértés (azaz nem csak a Wernicke terület felelős a beszédértésért), a szemantika, jelentés értésében fontos. Azonosítja a szavakat. Fontos a jelnyelvek megértésében is és a zene élvezetében. A félelem, harag és undor érzelmek feldolgozása is itt történik.

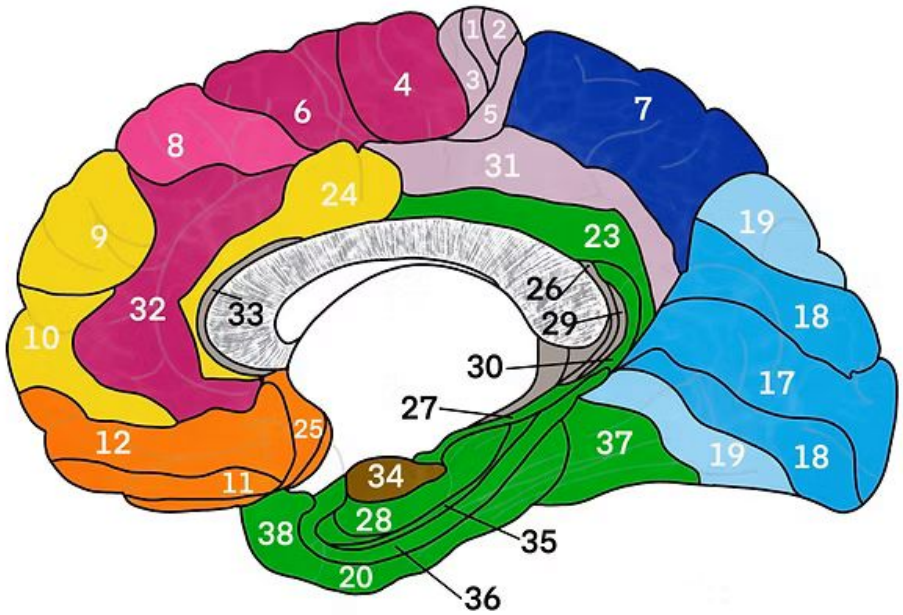
A hot, meleg, belső ingerek (érzelmek, motiváció) által meghatározott területek:

DMPFC (B12,24,25,32,33): A térbeliághoz és a belső ingerekhez való kapcsolódása miatt fontos személyiségtudatunk kialakulásában, önazonosságunk kialakításában, társas kapcsolataink során szerzett benyomásaink feldolgozásában. Részt vesz morális döntésekben, empátiát és altruizmust vált ki. A félelem és szorongás is aktiválja. Szintén képes gátolni a motoros kéreg válaszait nem megfelelő helyzetekben.

- BA12: látó és íz információk értékét méri fel
- BA24,25: a limbikus rendszerhez kapcsolódó övtekervény (cingalte cortex) részei. Keveset tudunk róluk, kapcsolatai alapján úgy tűnik a bioregulációt, testérzet-testkontrol és az érelmek feldolgozásában fontosak. Lehet miatta vagyunk hisztisek, ha fáj a fejünk, csikar a hasunk. A depresszióval is kapcsolatba hozzák, melyben a negatív érzete erősödnek és a pozitív érzetek gyengülnek.
- BA32: érzékeli és értékeli a szociális, társas helyzeteket, összetett racionális döntésekben vesz részt
- BA33: az emóciókat, elsősorban a boldogsággal apcsolatos érzéseket dolgozza fel



A koponya felszíne felé néző agyterületek Brodman beosztása. Balra néz az agy eleje, a homloklebennyel, a hideg oldal.



Az agyféltekék belső oldala. Baloldalt a homloklebeny területei, a meleg oldal.

VMPFC (B11,13,14): Itt dolgozzuk fel a kockázatokat és félelmeket, melynek eredményeként amigdalánkat tudjuk kordában tartani. Az amigdala könnyen mondja valamire, hogy félni kell tőle, de a bölcsebb PFC ezt felül tudja bírálni. Gyerekkorunkban azt tanultuk a felnőttektől, hogy a póktól, kígyótól félni kell, gyermeki amigdalánk ezt súlykolja, hacsak felnőtt PFCnk felül nem bírálja. Ez a teület is fontos az önmérsékletben, erkölcsben, abban, hogy hibáinkból tanulunk, kiértékeli tervezett cselekedeteink esetleges jövőbeli

következményeit és segít megérteni a társas közösség elfogadott szabályit.
A két terület együtt vesz részt a társas kapcsolatokban fontos elmeteória (Theory of Mind) alkalmazásában. Ez a képesség, lehetővé teszi, hogy megértsük és feltételezzük más emberek mást tudnak, mást gondolnak, mint mi, saját mentális állapottal rendelkeznek, más a céljuk mint nekünk. Ezáltal kitalálhatjuk gondolataikat, érzéseiket, szándékaikat és hiedelmeiket. Ez segít abban, hogy előre jelezzük mások viselkedését, együttérzést tanúsítsunk, rajtakapjuk őket egy hazugságon és hatékonyan kommunikáljunk velük. Fejlődése már kisgyermekkorban elkezdődik, és körülbelül 4-5 éves korra alakul ki teljesen, amikor a gyermekek már megértik, hogy mások másképp gondolkodhatnak, mint ők. Az autizmus spektrumzavarban szenvedő embereknél a mentáliselmélet gyakran sérült vagy eltérően működik. Többen úgy gondolják fontos volt a modern gondolkodáshoz szükséges tranzitív, több lépcsős, közvetett gondolati láncolatok használatának kialakulásához. Lásd a klasszikus esetet: Én tudom, hogy te tudod, hogy Béla tudja rólad, hogy te mit gondolsz rólam. Ember a talpán, aki ezt végig tudja gondolni. És hát legtöbbük, igen, tudja, így lettünk felegyenesedett emberek a talpunkon.

- BA11: hasonlóan a B12-höz, a látó és íz információk értékét méri fel, döntésekben, a jutalom feldolgozásában és az új információk hosszútávú memóriában való rögzítéséért felelős
- BA13: a döntésekben és a mozgás szabályozásában vesz részt
- BA14: a zsigeri érzetek és a szaglás feldolgozásában fontos, a szervezetből érkező, belső információkat olvasztja össze

A BA11 és 13 alkotja az orbitofrontálils (szemüreg fölött-elöl) kérget, ami fontos a tervezésben, a gondolati láncok kialakításában, melynek során korábbi egyenkénti asszociációkból, asszociációs láncokat épít. Mivel előre „lát" fontos egy feladatra adott válasz elvárt sikerének becslsében (így fontos be,enete a jutalmazási rendszernek is).

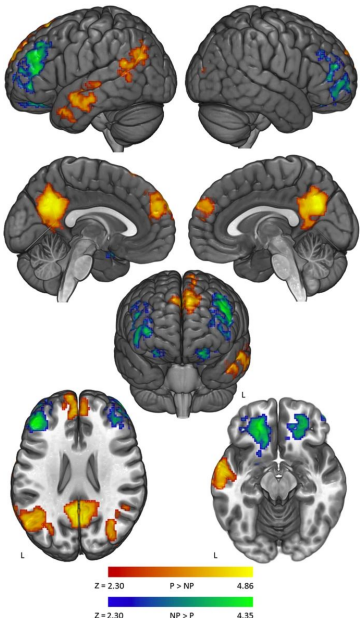
Bizonyára az alapos olvasónak feltűnt, hogy több funkció több helyhez is társult. Ez azért van, mert egy-egy feladat megoldásánál több PFC terület is aktiválódik, más-más arányokban és kapcsolatokban, kicsit más irányból nézek rá a problémára és kidolgoznak egy közös álláspontot.
A bal homloklebeny pozitív érzelmekkel, nyelvi feldolgozással, a céltárgy felé közeledéssel és a nyelvvel foglalkozik, míg a jobb, a negatív érzelmekkel, figyelem irányítással és a távolodási visszahúzódási reakciókkal.



Politikai hovatartozásunk meglátszik agyunkon, illetve az okság inkább fordítva van, agyunk működése meghatározza milyen érvrendszert fogadunk el.

Egyik kedvenc, érdekes tényem a PFCvel kapcsolatban. 2009-ben az ifjabb Bush második megválasztása előtt jelent meg egy érdekes és provokatív cikk a Nature folyóiratban, mely a legkomolyabb tudományos eredményeket teszi közzé. A kutatók funkcionális MR vizsgálatokban azt vizsgálták, hogy hogyan aktiválódik a kísérleti alanyok agya abban az esetben amikor több, egymásnak ellentmondó, kétséget ébresztő adatot kellett mérlegelniük egy döntéshez. Azt találták, hogy alapjában kétféle ember van. Vannak, akik egyszerűen nem veszik figyelembe az ellentmondó, a dolgokat finoman árnyaló híreket és általuk elfogadott normák vagy az általuk elfogadott megmondóember állítása alapján döntenek.És vannak olyanok, akik elgondolkodnak, kételyeket fogalmaznak meg és igyekeznek a tények alapján mérlegelni. Az utóbbiak esetében erősebb PFC

aktiválódást figyeltek meg. Ezekben az emberekben az ellentmondó tények komoly kognitív disszonanciát váltottak ki, hosszasabban elmélkedtek a dolgok helyességéről. A cikk végén a kutatók megjegyezték, hogy úgy tűnik összefüggés figyelhető meg a PFC aktiválódásának szintje és a kísérleti alanyok pártpreferenciája, politikai beállítódása között. A konzervatív, republikánus szavazók nem sok PFC aktivitást mutattak döntéshelyzetben, míg a liberálisabb, demokrata szavazók hosszasabban gondolkodtak a problémákon.



Egy kicsit komolyabb ábra. A nehéz politikai (sárga) és nem-politikai (zöld) döntések agyunk más területein történek. És persze embere válogatja ki mennyi agyi energiát használ döntéseihez.

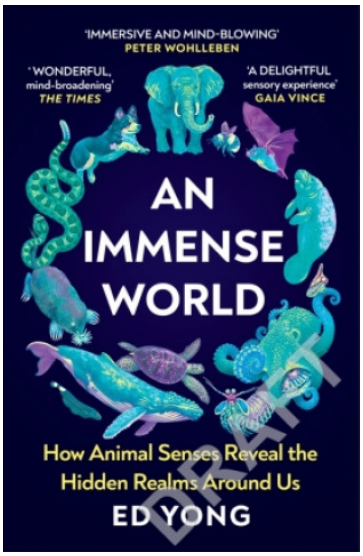
Ezzel egyenlóre végére is értünk a PFC viselt dolgainak. Használja mindenki eglszséggel! Mármint a PFCjét!

Szerző: **Gulyás Attila**

Jobb és bal félteke: miben mások

Nem hagyhatjuk oda a homloklebeny tárgyalását anélkül, hogy a bal-jobb agyféltekei különbségekről ne beszélnénk.
Miközben a homloklebeny viselt dolgai után kutattam, cikkeket és könyveket olvasva, forgattam egy másik könyvet is: Ed Young, Pulitzer díjas tudománynépszerűsítő könyvét, melynek címe „An Immense World", azaz, Hatalmas világ.

A könyv azt járta körbe, hogy a különböző élőlényeknek mennyire mások az érzékszervei, mint nekünk, főemlős embereknek. Az érzékeny orrokról, a testük egészét borító szemeket hordozó tengeri csillagokról, az elektromosságot érzékelő halakról, az ultrahanggal látó cetekről és denevérekről ír. A mi világunkat elsősorban látásunk, és ezen belül is előre néző,



3Dben látó szemeink határozzák meg. Nem is tudjuk elképzelni hogyan érzik a világot teljesen más érzékszervekkel rendelkező állatok.
A látásról szóló fejezetben azt írta, hogy a madarak nagy része (kivéve a baglyokat), akiknek a fejük két oldalál vannak a szemei, teljesen körbe látnak, 360 fokos a látómezőjük. Viszont mivel a két látótér nem fed át, ezért nem látnak 3Dben, nem érzik a dolgok távolságát. Ráadásul a két szemük precíz látásért felelős területei (az embernél a fovea, sárga folt) ellentétes irányba néz. Tehát, ha valamit pontosabban meg akarnak nézni, akkor egyik szemükkel oda kell fordulniuk, hogy a vizsgált tárgy képe a szemük közepén elhelyezkedő éleslátás területre essen. Ismerős ugye, ahogy a galamb és a csirke fél szemmel nézi meg mit csipked fel. A kutatók azt találták, hogy a csirkék általában a jobb szemükkel és emiatt a bal agyukkal nézik meg azt, amit precízen meg akarnak szemlélni. Mindeközben, szükségszerűen, a bal szemük és a jobb agyuk a másik irányba néz, a külvilágba, és észreveszi, ha ragadozó közeleg. Azaz, a két agyféltekében van egy munkamegosztás abban, hogy mit dolgozzanak fel. A bal fókuszál, tervez, a jobb átlát, védekezik. Mivel épp a bal és jobb homloklebeny munkamegosztásáról írtam, összeállt a kép (ötlet, nyilván ez még nem tudomány, ennek utána kell járni). Lehet, hogy a mi féltekei különbségeink is innen erednek! Hiszen nálunk is a bal félteke az analitikus, a mérnöki gondolkodó, a jobb pedig a szintetikus, a térbeli a világot befogadó. Elképzelhető, hogy ez a közös ősünkben, valami gyíkfélében kezdett el kialakulni. Igaz azóta nálunk a szemek a térbeli látást igénylő fán ugrálás miatt fejünk elejére kerültek és a két látótér jelentősen átfed, de agyunk megőriztük ezt a funkcionális szétválást. Ugye jobb, ha rendszereink szakosodnak egy-egy feladat tökéletes ellátására, ahelyett, hogy mindkettőt kb. jól megcsinálnák. Szóval lehet ez a bal-jobb féltekei eltérés eredete. Az persze valószínűleg teljesen esetleges, hogy a bal vagy a jobb félteke lett az analitikus vagy szintetikus, de hogy elváljon az kb. törvényszerű volt a fentiek alapján.



A csirkék jobb szemükkel nézik meg közelebbről a dolgokat. Ezalatt bal szemük a külvilág fele néz és észreveszi ha menekülni kell. Lehet ez az alapja a féltekék információ feldolgozás belis szakosodásának?



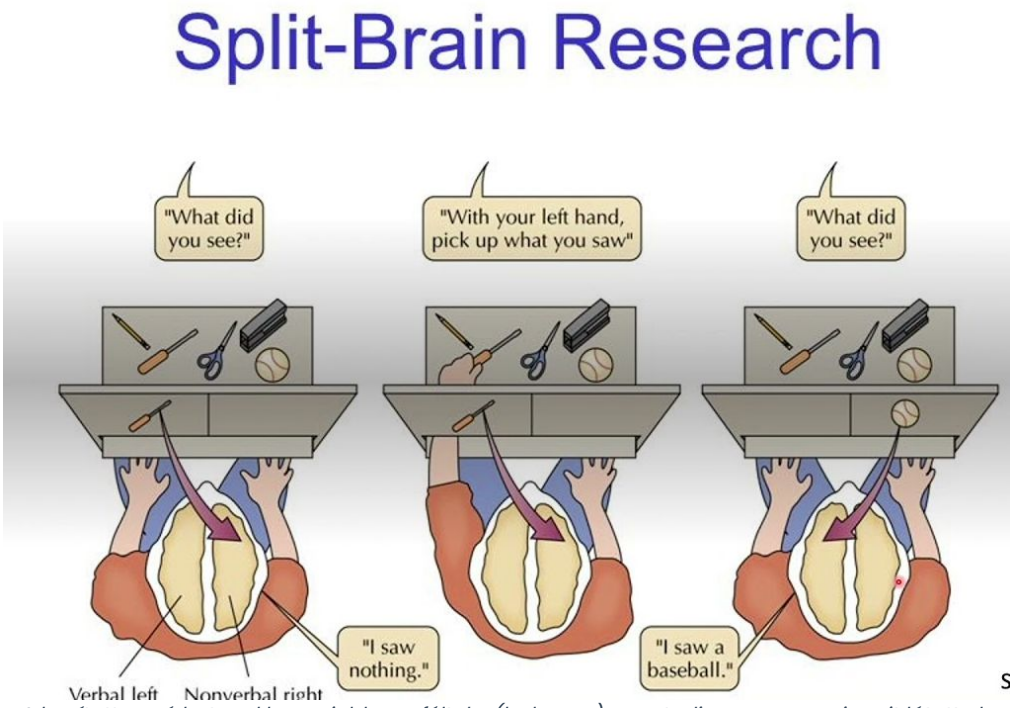
Jobbról közelíts :) !

Mi ebből az életre szóló tanulság? Ha az ember madarat, ebédre való csirkét akar fogni, akkor érdemes azt jobb oldala felől becserkészni, mert ezen az oldalon valószínűleg rosszabb a reakcióideje 😊

Komolyra fordítva a szót. Az evolúcióbiológiai felvezetés után vegyük át, mire szakosodott a jobb és a bal agyfelünk.

Roger Sperry és Michael Gazzaniga az 1960as években olyan betegeket vizsgált, akikben elvágták a két agyféltekét összekötő tekintélyes rosthálózatot a corpus callosumot (kérges test), hogy megakadályozzák epilepsziás rohamaik terjedését. Ennek eredményeként a két agyfélteke kölcsönhatása jelentősen csökken (akadnak még kereszteződő rostok máshol is). Emlékeztek ugye szegény HM-re, akinek mindkét oldali hippokampuszát vették ki

hasonló céllal, amitől élete hátra levő részére nem tudott új emlékeket szerezni és tényeket tanulni. No a hasított agyú (split brain) betegek kicsit jobban jártak, de érdekes dolgokat lehetet náluk megfigyelni.



A hasított agyú betegekben a jobb agyfélteke (bal szem) nem tudja megnevezni amit látott, de képes megtalálni. A bal félteke (jobb szem) pedig meg udja nevezni, d enem találja meg.

A vizsgálatokban azt a tényt használták ki, hogy az agyba belépő érzőidegek (kivéve a szaglást) kereszteződnek. Így pl. a jobb látótérbe eső dolgok képe a bal agyféltekében dolgozódik fel, és fordítva. Hasított agyú betegekben tehát elérhető, hogy csak az egyik vagy a másik agyfélteke feldolgozását vizsgáljuk azzal, hogy hova helyezünk egy tárgyat. Mivel a két félteke nem tudott kommunikálni egymással, a válaszokból következtetni lehetett, melyik félteke milyen feladatokban vesz részt.

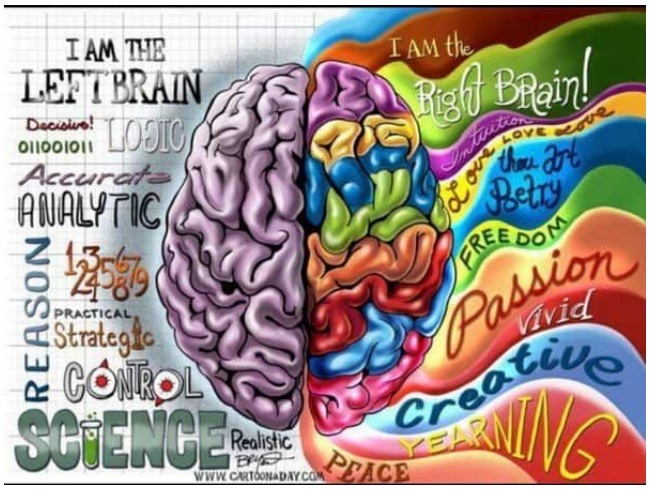
A következőket figyelték meg:
Ha egy tárgyat a bal látómezőbe vetítettek (tehát a jobb agyféltekébe jutott), a beteg nem tudta megnevezni, hogy mit látott. De ha a kezével (bal kéz – jobb félteke) kellett kiválasztani a tárgyat, akkor pontosan rámutatott. Ez azt igazolta, hogy a **nyelvi központok főként a bal agyféltekében** helyezkednek el, de a **térbeli azonosítást a jobb félteke** tudta elvégezni. A jobb agyfélteke képes volt felismerni tárgyakat és azok funkcióját, de nem tudta „elmondani" – csak „megmutatni". Azaz: Nyelv és beszéd-bal agyfélteke; Tárgyfelismerés - jobb agyfélteke

Kézhasználat és motoros kontroll: A bal kéz (jobb agyfélteke irányítása alatt) képes volt kirakni egyszerű formákat vagy kirakósokat, míg a jobb kéz (bal agyfélteke) nehezebben teljesítette azokat.
Érzelmek és vizuális felismerés: Ha egy arcot csak a jobb agyfélteke látott, a beteg érzelmileg reagált (pl. mosolygott), de nem tudta megmagyarázni, hogy miért.

Évtizedek alatt a következő feladatmegosztást rendelték az egyes féltekékhez:

Bal agyfélteke (Racionális, logikus), A Mérnök
Nyelvi feldolgozás: Beszéd, írás, olvasás, nyelvtani szabályok.
Logika és analízis: Problémamegoldás, matematikai számítások.

Számok és sorrendiség: Időérzék, adatok rendszerezése.
Részletekre való fókusz: Pontosság, strukturált gondolkodás.
Analitikus gondolkodás: Ok-okozati kapcsolatok felismerése.



Az agyféltekék különbsége: Bal - mérnök, Jobb - művész. D emint az a következő bejegyzésben látjuk majd, normális emberben együttműködnek és közösen dolgozzák ki a kétoldlaról körbejárt problémára adott választ.

Jobb agyfélteke (Kreatív, intuitív), A Művész
Vizuális és térbeli feldolgozás: Arcok, formák, minták felismerése.
Kreativitás és művészet: Zene, rajzolás, festészet.
Intuíció és érzelmek: Hangulatok felismerése, empátia.
Egészleges gondolkodás: Az összkép, a „nagy kép” látása.
Nem verbális jelek értelmezése: Testbeszéd, hanghordozás.

Tovább is van. Legközelebb…

Szerző: **Gulyás Attila**

Jobb és bal félteke: kiegészítik egymást

Az előzőekben a hasított agyú betegek jobb és bal féltekéjének különbözőségeit mutattuk be.

De egészséges, mindennapi esetben a két félteke együttműködik, kiegészítik egymás szakértelmét. A két agyfélteke között a kérgestest (corpus callosum) biztosítja a kommunikációt, lehetővé téve az információk folyamatos áramlását. Ennek köszönhető, hogy például a nyelvi központ (bal félteke) együttműködik a beszédhangok érzelmi árnyalatait érzékelő jobb féltekével.

Egy matematikai feladat megoldásakor a bal félteke logikai lépésekre koncentrál, míg a jobb félteke segíthet a minta felismerésében és az általános irányok betartásában. Egy zenei előadás során a jobb félteke az érzelmi tartalmat érzékeli, míg a bal félteke a dalszövegre és a ritmusra figyel.

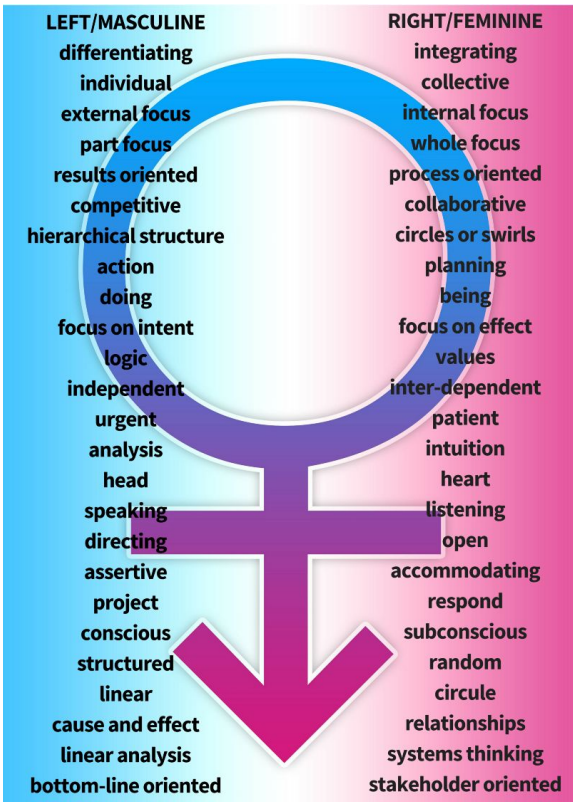
A bal-jobb szétválás alapján az a nézet terjedt el, hogy vannak emberek, akik az egyik, mások a másik féltekéjüket használják, és ez meghatározza miben lesznek jók. A helyzet ennél árnyaltabb, hiszen egészséges esetben a féltekék kölcsönhatnak, szakosodásuk csak a hasított agyuk betegekben látszik. Funkcionális MR vizsgálatokban nem is találtak félteke aktiválódás különbséget különböző gondolkodású emberekben.

Együttműködés hiányában a split-brain páciensek néha úgy tapasztalták, hogy a bal kezük (jobb félteke irányítása alatt) „önálló életet” él (mint Dr. Strangelove esetében), például gombokat kapcsolgatott vagy ruhát cibált – ezt „idegen kéz szindrómának” nevezik. Ez kicsit azt is jelzi, mintha a bal félteke-jobb oldal cselekdetei kicsit közelebb lennének tudatosságunkhoz, a jobb félteke-bal oldal pedig távolabb. Majd a következő részben látni fogjuk, hogy miért van ez.

Ami fontos mg, hogy a bal és a jobb agyféltekében részben elkülönül a pozitív és negatív érzelmek feldolgozása, bár a folyamat összetett és mint láttuk a két félteke szorosan együttműködik. Közösen mérlegelik a pozitív és negatív összetevőket. A bal félteke inkább a pozitív érzelmekért és a „közelítő” viselkedésekért felelős. Ez azt jelenti, hogy akkor aktívabb, amikor valami kívánatos vagy örömteli felé közelítünk. Máshogy fogalmazva akkor közelítünk, ha a bal félteke érvei a meggyőzőbbek az adott helyzetben. Ilyenkor lelkesedést, elégedettséget, örömöt érzünk. Ezért fontos a célorientált magatartásban, problémamegoldásban és motivációban. A jobb félteke inkább a negatív érzelmek feldolgozásában és az „elkerülő” viselkedésekben játszik szerepet. Akkor aktiválódik, amikor fenyegetést, veszélyt vagy fájdalmat érzékelünk. Szomorúságot, félelemet, szorongást vagy haragot érzünk. Ezért fontos a stresszreakciókban, a veszély érzékelésében és a túlélési ösztön vezetésében. Ismerős ez a csirkétől? Jobb szemmel, bal aggyal nézi a magot, amihez közelít és közben bal szeme, jobb agya figyeli a külvilágot, amitől menekülhetnie kell. Mindezek miatt stroke vagy sérülés a bal féltekében gyakran depressziós tünetekhez vezet. Stroke vagy sérülés a jobb féltekében eufóriát vagy érzelmi közönyt okozhat.



A híres Kubrick filmben Dr Strangelove karaktert mintázta a film a rakétatudósról, az Apollo program zsenijéről, aki korábban a náci rakéta programot vezette.



Olyan ábrát is találtam, ahol a bal-jobb féltekék különbséget hasonlítják a dolgok iránti férfi-női megközeltítési módokkal. Ez is egy nézőpont és van benne igazság. De persze mint írtuk, a két félteke együttműködik, azaz, az biztos nem igaz, hogy a férfiak a balt a nők meg a jobb féltekéjüket használják. De elképzelhető, hogy más súllyal szólnak bele a döntéseikbe. És ne felejtsük, a férfiak vakon belemennek helyzetekbe, a nők óvatosabbak, azaz bal és jobb homloklebenyből eredő pozitív közelítő és negatív távolító érzelmek megcsíphetők a két magatartásban.

Mint egy bejegyzésben már pedzegettük úgy tűnik a bal, logikus félteke domináns a jobb felett, kicsit elnyomja. Mindennapi életünket a bal homloklebenyben található hajcsár uralja, aki állandóan feladatokat oszt, mérlegel, kételkedik és nem hagyja, hogy a jobb félteke mindent elfogadó, megértő, szintetizáló gondtalan boldogságában éljünk. Gyakorlott meditálók vizsgálata során azt találták, hogy a meditáló képes elcsendesíteni bal homloklebenyét és ezért kicsit több látszik a jobb félteke szociális, világot befogadó életélményéből.

A dominancia kapcsán még egy dolgot rendbe kell tenni. Annak ellenére, hogy az emberek 10%-a balkezes ez nem azt jelenti, hogy mindannyiuknál a jobb oldal lenne a domináns, ott lenne a beszédközpont. 70%-ukban, mint a jobbkezeseknél, a bal oldalon van a nyelvi központ, az a domináns félteke. Ami viszont megfigyelhető, hogy a balkezesek nagyobb része mutat szimmetrikusabb vagy kevésbé tipikus agyi dominanciát, ami például művészi vagy kreatív képességekben nyilvánulhat meg.



A született balkezes. No ez persze nem én vagyok.

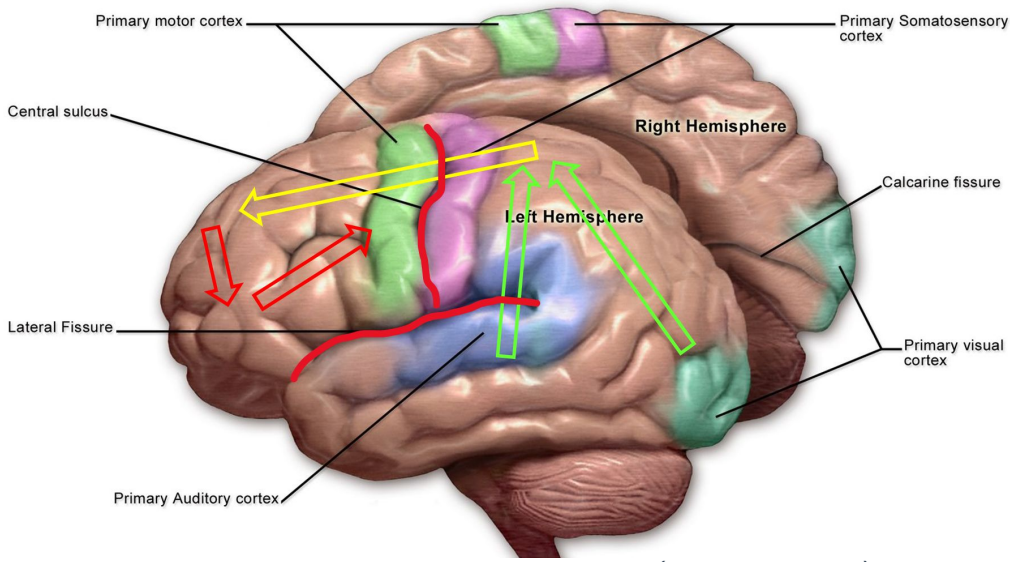
Régen ugye rossznak tartották, ha valaki balkezes. Ezért engem is valószínűleg átszoktattak a jobbkezes írásra, rajzolásra az óvodában. Ezt onnan sejtem, hogy míg írni, rajzolni csak jobb kézzel tudok, a fogamat kizárólag bal kézzel tudom mosni, jobbal teljesen reménytelen vagyok. Vélem, a fogmosást még az óvoda előtt tanultam, amikor természetes volt számomra, hogy a bal kezemet használjam. Azt mondják az átszoktatás később okozhat gondokat. Saját esetemben nehéz kideríteni a furcsaságaim ettől vannak-e? Bár hozzá kell tegyem igen rondán írok. 😊 Mindenesetre az az előnye megvan a dolognak, hogy egyformán ügyesen tudok fűrészt, vésőt, csavarhúzót és kalapácsot használni mindkét kezemmel Ez különösen fűrészelésnél fontos. Amikor elfárad az egyik kezem, váltok.

Hát ennyit a homloklebenyről.

Szerző: **Gulyás Attila**

A visszacsatolás dícsérete III.: A mozgástervezés és a gondolkodás hurkai

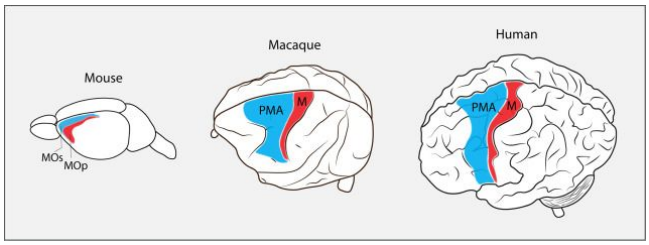
Az agysétét valahol a homloklebenynél hagytuk el. A most induló minisorozat azt járja körbe, emberi agyunk hogyan tervezi meg a mozgásokat és ehhez hasonlóan hogyan gondolkodik.
A válasz megtervezésének lépéseinél láttuk, hogy az érzékszervi ingerek összefonódó lépcsőkben dolgozódnak fel, egybeolvadnak az egyes modalitások és kialakul belső állapotuknak és a világnak egy elvont, összetett agyi reperezentációja, mely eljut többek között a homloklebenybe, ahol a jelen és a múlt alapján megfogalmazódnak a szándékok, a jövő.



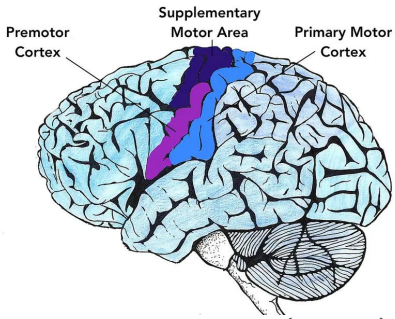
Az információ áramlása az agyban. Az agyat két nagy árok (sulcus, fissure piros) tagolja. A centrális sulcus előtt találhatók a mozgató kéregek, előttük a homloklebeny, mögötte, pedig az érző területek. A lateral fissure a halántéklebenyt választja le, itt atlálható a hallókéreg. Az érző kérgekben több lépcsőben feldolgozódik az információ (zöld nyilak), mely innen a homloklebenybe kerül (sárga nyilak). A homloklebeny több lépcsőben feldolgozza az össze érzékszervből érkező (multimodális) információt (piros nyilak) és a terveket eljuttatja a motoros

kérgeknek.

Az agykéregben az információáramlás iránya durván hátulról-alulról a tarkó és halántéklebenyektől előre-fölfelé a fali és homloklebenyek felé történik. A nagy határvonalak a centrális sulcus (központi árok), mely a falilebeny közepén fölülről-lefelé húzódik, valamint a halántéklebeny nagy árka, mely majdnem vízszintesen választja el a halántéklebenyt a falilebenytől. Az emlős agyakban hátul van a látókéreg, előtte a testérzékelő kéreg (a centrális sulcus mögött, erre szokták rárajzolni az érzékelő homonculust a nagy nyelvével, kezeivel és ivarszerveivel), a halántéklebenyben pedig a hallás feldolgozása található. A centrális sulcus előtt, és a halántéklebeny nagy árka fölött található a mozgató kéreg. Egyszerű lényekben ennyi (ott még árkok és tekervények sincsenek): az érzékelő kérgek előtt van a mozgató kéreg. Az evolúciós fejlődés során az egyes agyterületek megsokszorozódnak és az információ soklépcsős feldolgozására szakosodnak. Kialakultak a másodlagos (modális) érző és mozgató kérgek, majd később az intermodális asszociációs területek. Ez megtörténik mind az érző, mind a mozgató területeken. Mint ahogy a földművelés kialakulásánál a falvakba telepedő emberiség első mestereit az ácsokat (akik a rönkökből házakat építettek) követték a szakosodottabb mesterségek, a kovácsok, az asztalosok, a tetőfedők, stb. Ők már egymásnak adták tovább és alakították a dolgokat.

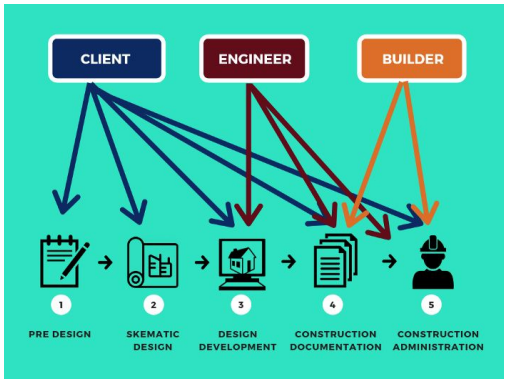


A mozgató kérgek és a belőlük fejlődő homloklebeny evolúciója. Az egérben (bal) az elsődleges (MOp, piros) és a másodlagos (MOs, kék) mozgató kérgek végzik a tervezést. Ők találhatók az agy elején. A makákó (középen) agyában a két területenek megfelelő agyterületet PMA (premotor area =PMC) és M1 nek nevezik, de már elkezdtek kialakulni előttük a holoklebeny területei. Az emberben (jobb) a holoklebeny mérete tovább nőtt, számos új, szakosodott terület jelent meg.



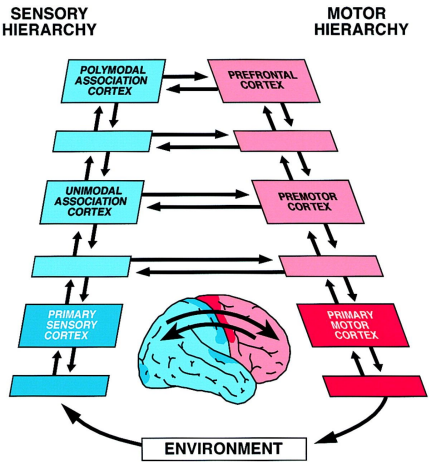
Az emberi agy mozgató (motoros) területei. Az SMA (supplementary motor are, = SMC), átadja az információt a premotor kéregnek (PMC), mely azt további feldolgozás után az elsődleges motoros kéregbe (primary motor cortex, M1) továbbítja. Innen indulnak majd a parancsok az izmok felé.

Az elsődleges mozgató kéreg (M1) előtt megjelentek a másodlagos (premotor, PMC) és a járulékos (supplementary, SMC) motoros kérgek, amelyek már nem egyszerű izommozgató parancsokat dolgoznak ki, hanem bonyolultabb mozgásokat terveznek és adnak át az elsődleges mozgató kéregnek kivitelezésre. Hasonlóan ahhoz, mint ahogy az építészek átadják a terveket a statikusoknak és épületgépészeknek, akik kidolgozzák az épület részletes terveit, melynek alapján a kivitelező az építkezésen a munkásokkal megépítteti az épületet.



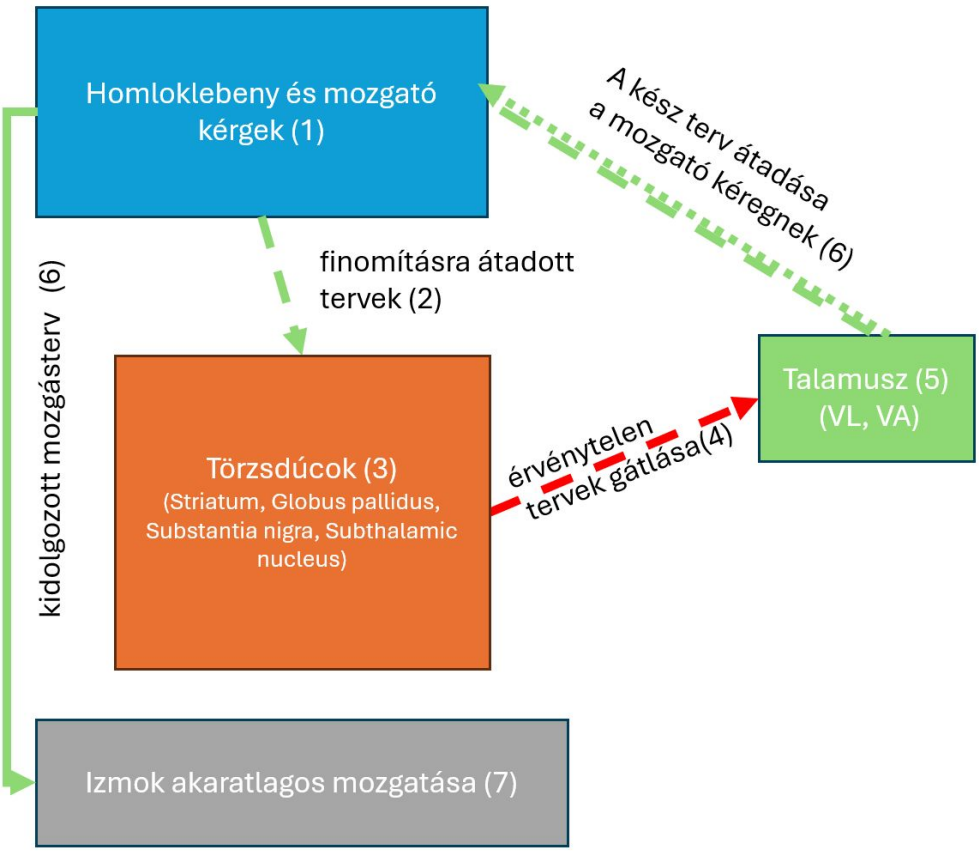
A homloklebeny és a motoros kérgek hasonlóan sokszintű módon tervezik meg a mozdulatokat és a szándékokat, mint ahogy megrendelők, építészek, mérnökök és kivitelezők kapcsolódnak egy tervezési és kivitelezési láncba.

Kezdetben egy egyszerű emlős csak mozdulatokat tervezett, de aztán a mozgástervező magasabb rendű motoros kérgek elé újabb kéregterületek specializálódtak. Elkezdett kialakulni a gondolkodásunkhoz és személyiségünkhöz oly fontos homloklebeny (a prefrontális cortex). Nem csoda, hogy ide került, hiszen a gondolatok tervezése hasonlít a mozdulatok tervezéséhez, csak egy-két absztrakció szinttel feljebb van.



Az érzékelés-rakció hierarchiája. A csúcson a homloklebeny áll.

A mozgató kérgek előtt megjelent homloklebenynek (PFC) köszönhetően az emberi gondolkodás annyival több, mondjuk a tengeri malacénál (annak mozgástervezésénél), hogy nem impulzívak vagyunk, azaz nem csak az éppen jelen levő ingerekre reagálunk, hanem belső állapotaink (szándékaink, hangulatunk, terveink) befolyásolják és indítják a cselekedeteinket. Ahogy megjelentek az egyre absztraktabb reprezentációkra képes agyterületek, a mozdulatok is elvonttá, gondolatokká, szándékokká váltak.Ne feledjük, hogy **az agyban miden mintázat és annak átalakulása. Az agynak mindegy, hogy egy izommozgás sorozatot vagy egy matematika feladatot old meg.** Hasonló rendszereket használ. A továbbiakban a mozgás tervezésének hurkait járjuk körbe, melyek aztán rávilágítanak a gondolkodás hurkaira is.



A mozgás tervezésének egyszerűsített vázlata. A homloklebenyben kidolgozott tervek közül a törzsdúcok kiszűrik a nem megvalósíthatókat. A maradék tervek az elsődleges mozgató kéregben

véglegesítődnek és végrehajtásra kerülnek az izmokban.

Nagyon röviden: A homloklebenyben megfogalmazódott számos lehetséges mozgási szándék a mozgatókéregből a törzsdúcok-talamusz, valamint a kisagy-talamusz információ áramlási hurkaiban faragódik egyetlen megvalósítható, kivitelezett mozdulattá, akár több körben is.

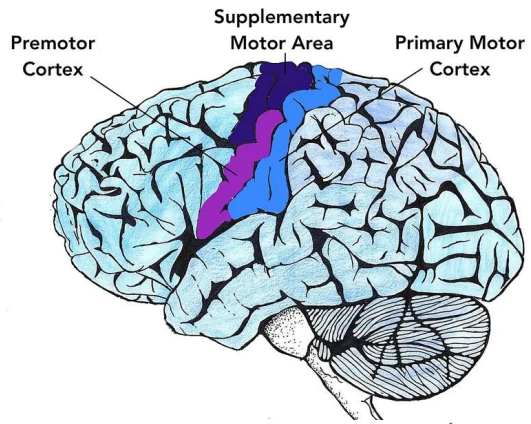
A fenti folyamatnak két szakasza van. Az elsőben a kérgek kidolgozzák a lehetséges terveket, a másodikban a törzsdúcok (striátum, globus pallidus, substantia nigra, subthalmic nucleus) gátló rendszerei lefaragják az aktuális helyzetben kivitelezhetetlen terveket (mozgás, gondolat). A végső terveket pedig az agykéreg eljuttatja a gerincvelőbe az izmokon végződő mozgató idegsejtekhez.

Akár ennyi is elég lehetne, de aki alaposan meg akarja érteni a részleteket és trükköket, annak most jönnek a részletek. Először mint egy eposzban, kezdjük a szereplők ismertetésével, a rendszer anatómiájával (ez nem lesz teljesen új a korábbiak alapján), majd jön a cselekmény.

Szerző: **Gulyás Attila**

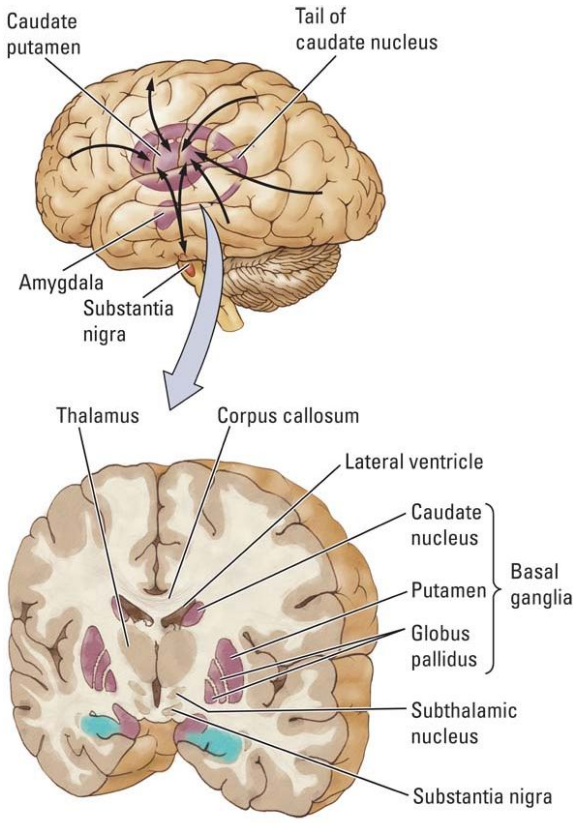
A mozgástervezés hurkainak anatómiája

Egy hálózatot ugye csomópontok és élek határoznak meg. A mozgás (és gondolat) tervezés hálózatának ismertetését kezdjük a csomópontokkal, jelen esetben a mozgástervezésben résztvevő agyterületekkel.
Maradjunk a korábban bevált felosztásnál. Kezdjük az agykéreggel és onnan induljunk lefelé. Hagyjuk most a jól ismert érző ágat, kezdjük a csúcson a homloklebenynél. Ugye ennek számos alterülete van, melyek megfogalmazzák a célokat és szándékokat.



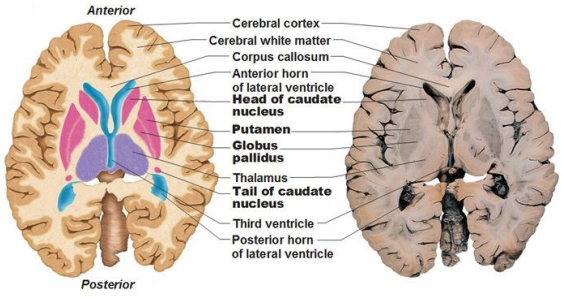
A motoros kérgek elhelyezkedése. Előttük (az ábrán balra) találhatóak a homloklebeny változatos funkciójú területei, melyektől a terveket kapják (a törzsdúc és kisagykör jóváhagyását követően).

A homloklebenyben fényesre csiszolt tervek a járulékos (SMC) és másodlagos motoros (PMC) kérgen keresztül az elsődleges motoros kéregbe (M1) kerülnek. A gimnáziumi tananyagban is benne van, hogy innen egyrészt indul egy közvetlen pálya a gerincvelői motoneuronokig, az idegsejtekig, akik az izmokat vezérlik. Másrészt egy közvetett pálya, ami a középagyban és nyúltagyban átkapcsolva jut el ugyanezekre a mozgató idegsejtekre. Az első pályát piramis pályának hívjuk, jellegzetes agyfelszíni lefutása miatt, és a tudatosan irányított finom mozgások irányításában fontos. A másodikat, extra-piramidális pályának (piramis pályán kívüli) nevezik. Ezen keresztül a tudatosságot kevésbé igénylő, automatikusabb mozgások, mint pl. a testtartás, egyensúly, tónus irányítódik.
De, mint látjuk majd hamarosan, ennyi nem elég a mozgástervezéshez. A színen megjelennek az agykéreg alatti területek, a törzsdúcok (basal ganglia), a kisagy és a talamusz.



A törzsdúcok függőleges irányú metszete. A féltekéket borító agykéreg alatt, szinte rétegesen borul egymásra a striátum (caudate nucleus és putamen) valamint a globus pallidus. A subthalamic nucleus és a subtantia nigra mélyebben a köztiagyban és a középagyban találhatók.

A törzsdúcok a striátumból, globus pallidusból (GP), subtantia nigrából (SN) és a subthalamic nucleusból (STN) állnak, melyek az előagy két féltekéjében az agykéreg felszíne alatt helyezkednek el. Hogy az élet bonyolultabb legyen, a striátum caudate nucleusra (CN, farkos mag) és putamenre (P) tagolódik, a globus pallidusnak van externa (GPe, külső) és interna (GPi, belső) része, illetve a substantia nigra is feloszlik pars compacta (SNpC, tömör) és pars reticulata (SNpR, hálózatos) részre. Ezeket a felosztásokat azért hánytorgatom fel, mert az egyes részeknek más a kapcsolatrendszere és ezáltal a szerepe a tervezés irányításában.

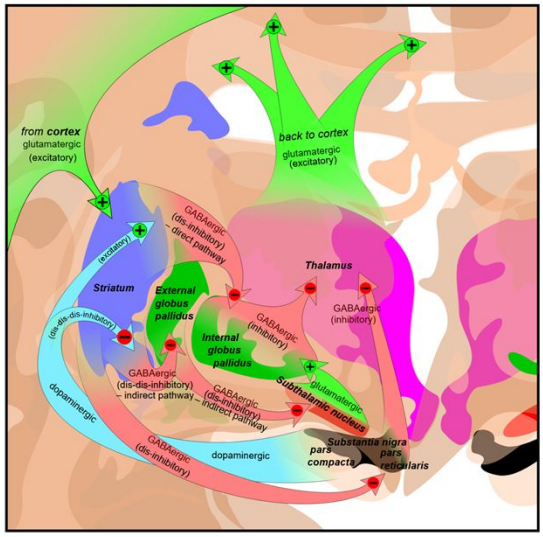


A törzsdúcok az agy vízszintes metszetében (felülről nézve).

A törzsdúcok inkább egy funkcionális fogalom, mint anatómiai. A striátum és a GP az előagy (telencephalon) része, az STN a köztiagy (diencephalon), a SN pedig a középagy (mesencephalon) része. Az egyes területeken eltérő átvivőanyagokat felszabadító és ezáltal eltérő hatásokat kifejtő sejtek találhatók. A striátum sejtjei GABAt szabadítanak fel, ezért gátlóak, az STN sejtjei glutamáttal serkentenek, az SNpC sejtjei dopamint, az SNpR sejtjei pedig GABAt szabadítanak fel.
A kisagy és a hozzákapcsolódó többlépcsős bemeneti és kimeneti rendszerek finomságaiba itt most nem megyünk bele. Legyen annyi elég, hogy a kisagy kimenetét gátlósejtek alkotják.

A hálózatleírás második elemeként jöjjenek a kapcsolatok, a pályák, melyek egy

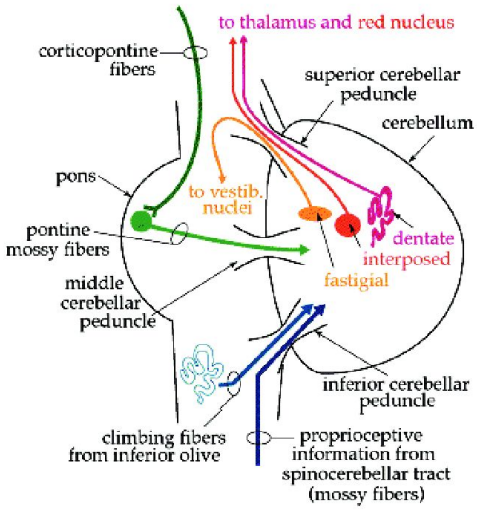
meglehetősen bonyolult rendszert alkotnak.



A törzsdúcok kapcsolatrendszere. Itt most csak elrettentésképpen. Hamarosan kifejtjük hol mi történik.

Az agykéregből (5. réteg) serkentés érkezik a striátumba. A magasabb területek (homloklebeny) a CN-ba, az alacsonyabb rendű mozgatókérgek a P-be vetítenek.
A striátumból 3 irányba indul gátlás: a GPe-ba (indirekt pálya), a GPi-ba (direkt pálya), valamint a SN-be.
A SNpC adja a striatum felé a tanulásban és jutalmazásan oly fontos dopaminerg pályát, mely az innen induló direkt pálya sejtjeit serkenti, az indirekt pálya sejtjeit pedig gátolja.
A GPe gátolja az STN-t, mely serkenti a GPi-t.
A GPi és a SNpR adja a törzsdúcok gátló kimenetét a talamusz felé (VL, VA magok), mely serkentő információt küld a kéreg felé, ezzel bezárul a kéreg-törzsdúcok-talamusz kör.

A kisagyból érkező gátló kimenetek az előző hurokhoz képest szintén a talamusz VL és VA magjain végződnek. Azaz a törzsdúc és a kisagy körből érkező gátlás az agykéregbe serkentést küldő talamusz sejteken fut össze.



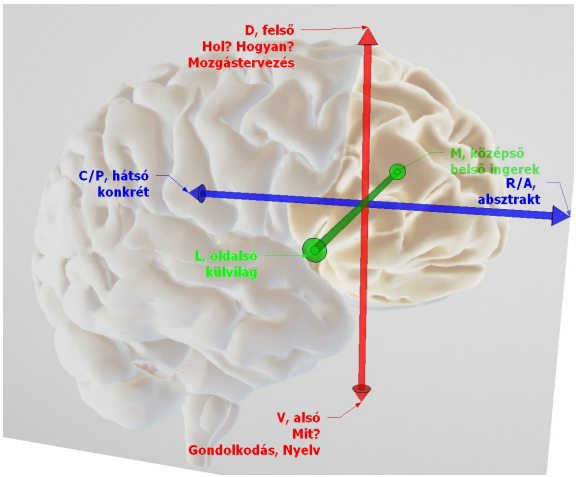
A kisagy közvetve bemenetet kap az agykéregtől és közvetve vetít a talamuszba. De ennek a körnek a részleteibe nem fontos elmerülnünk.

Nos a kemény anatómiai alapozás megvolt. Jöjjön most a tervezés két lépése: 1) hogyan állít elő terveket a kéreg és, 2) hogyan horgonyozza le a valósághoz a terveket a törzsdúci és a kisagyi kör azzal, hogy a nem működő agykérgi terveket gátolja.

Szerző: **Gulyás Attila**

A tervezés lépései a homloklebenyben és a mozgató kéregben

Mint azt írtuk a homloklebeny (PFC), kulcsszerepet játszik a döntéshozatalban, a feladatok kiválasztásában és a megoldásukban. A folyamat során az agy több tényezőt mérlegel, hogy eldöntse, melyik feladatra összpontosítson. Az egyes területek a lehetséges tervek kidolgozásának eltérő szempontjait veszik figyelembe és a végén ezeket összegezve adják majd át végleges kidolgozásra a járulékos, másodlagos, majd elsődleges mozgató kérgeknek.



A 3 funkcionális tengely a homloklebeny szerveződésében. A homloklebeny egyes területei más bemenetek alapján más típusú feladatokat oldanak meg.

1) **Célok és prioritások meghatározása**
A dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) elemzi a hosszú távú célokat és összehasonlítja a feladatokat az aktuális szándékokkal.
A ventromediális prefrontális kéreg (VMPFC) értékeli az érzelmi és jutalommal kapcsolatos tényezőket.
Jutalom és veszteség kiértékelése
Az orbitofrontális kéreg (OFC) összehasonlítja a lehetséges jutalmakat és kockázatokat.
Ha egy feladat nagyobb jutalomértékkel (pl. pénz, sikerélmény, társadalmi elismerés) bír, előnyben részesülhet.

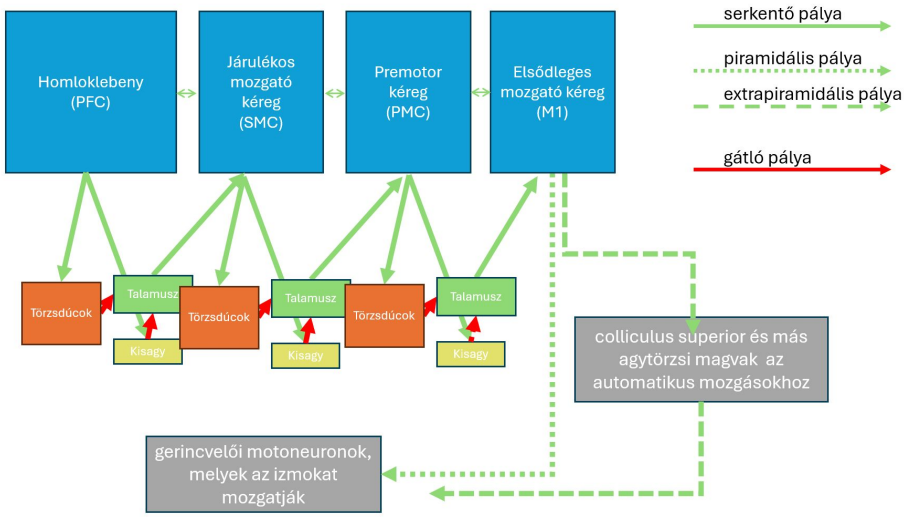
2) **Végrehajtási kontroll és konfliktuskezelés**
Az anterior cinguláris kéreg (ACC) figyeli a konfliktusokat és segít a megfelelő választásban. Például, ha két feladat verseng a figyelmünkért, az ACC segít kiválasztani azt, amelyik jobban illeszkedik az aktuális állapotunkhoz vagy céljainkhoz.

3) **Kognitív rugalmasság és figyelmi váltás**
A dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) segít váltani a különböző feladatok között, ha a környezet megváltozik. Ha például egy új probléma sürgősebbnek tűnik, az agy dinamikusan átrendezheti a prioritásokat.

4) **Motiváció és érzelmi állapot szerepe**
A PFC limbikus rendszerrel (pl. amigdala, hippocampus) alkotott kapcsolata befolyásolja, hogy melyik feladat tűnik fontosabbnak. Stresszes helyzetben a homloklebeny inkább a rövid távú, azonnali eredményt hozó döntéseket preferálja.

A homloklebeny tehát tudatos célkitűzés, jutalomelemzés és végrehajtási kontroll alapján dönti el, hogy melyik feladatot oldja meg először. Egyfajta „kognitív menedzserként”

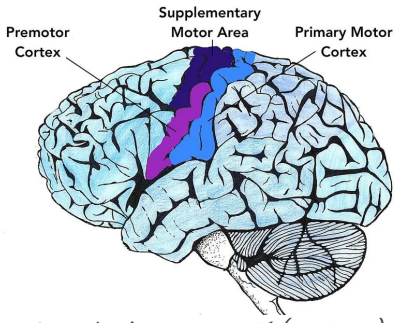
működik, amely a környezeti ingerek, a belső állapot és a célok alapján optimalizálja a döntéshozatalt.



A tervek kidolgozásának során az egyes kérgi területek a törzsdúc/kisagy-talamusz körökön keresztül adják át a megszűrt információt egymásnak. A végső mozgásterv az M1 kéregből a piramidális (direkt, finom, akaratlagos mozgások) és az extrapiramidális (indireket, automatikus, durvább mozgások) pályákon keresztül jut el a gerincvelői mozgató idegsejtekhez.

A feldolgozás lépcsői során az egyes kérgi területek elsősorban nem egymásnak adják tovább a lehetséges terveket, hanem azokat megfuttatják a kéreg-törzsdúc-talamusz és a kéreg-kisagy talamusz körökön is, melyek gátlás útján „kidobálják" az aktuális helyzetben nem működő megoldásokat és a megmaradtakat továbbküldik a mozgástervezési hierarchiában következő kéregterületnek. Ami fontos itt, hogy az egyes átadás-lépcsők nem ugyanazon az anatómiai körön futnak, hanem párhuzamosan az egykérgek által beidegzett, egymással nem átfedő területeken. Azaz pl. a PFC a striátumon belül a CN-be, a mozgató kérgek a P-be vetítenek tovább. Azaz a CN és a P, az absztraktabb Mit? és a konkrétabb Hogyan? kidolgozásában vesznek részt.

Nézzük mit csinálnak a motoros (mozgató) kérgek a homloklebenyből érkező, a törzsdúcok és kisagy által szűrt információval (amiket majd ők is ezen körök felhasználásával küldenek tovább egymásnak):
Járulékos motor cx (SMC): A PFC az összetett motoros akciók összehangolásának terveit küldi ide, a mozgások indításában és sorba rendezésében fontos, a belsőleg generált akaratlagos mozgások tervezésében játszik szerepet, a korábban tanult mozgássorozatok itt tárolódnak és innen hívódnak elő.
Premotor cx (PMC): A PFC magas rendű célokat és akcióterveket küld ide, a mozgások tervezésében és az azokra való felkészülésben, külső ingereket fogad (látás, térbeli helyzet) és ezeket beledolgozza a mozdulatokba.
Elsődleges motor cx (M1): izommozgás sorozatokra bontja a feladatokat, végrehajtja az akaratlagos mozgásokat
Az SMC -> PMC -> M1 feldolgozási lánc mellett egy közvetlen SMC -> M1 kapcsolat is működik.



Az emberi agy mozgató (motoros) területei. Az SMA (supplementary motor are, = SMC), átadja az információt a premotor kéregnek (PMC), mely azt további feldolgozás után az elsődleges motoros kéregbe (primary motor cortex, M1) továbbítja. Innen indulnak majd a parancsok az izmok felé.

A mozgatókérgek bármely pontja nagyobb területre kiterjedő izomcsoportok mozgását

irányíthatja. A feldolgozási láncban előre haladva ezek a területek kisebbek lesznek.
Az SMCben egyes idegsejtek sok izmot, egész testtájakat, sőt a test mindkét oldalán található izmokat mozgatnak. Akkor aktívak amikor valami szándék alapján korábban begyakorolt mozgássorozatokat tervezünk használni. A PMC működési alapon négy alterületre osztható. A PMDc a dolgok megragadását irányítja, PMDr fontos a válasz szabályok megtanulásában, az észlelt ingereket és a hozzájuk tartozó helyes válaszokat tárolja, PMVc a testünk körülötti, általunk elért teret figyeli és segít a térben elhelyezkedő ingerekre adott válaszokban, fontos a test védelmében, ehhez látó és halló információt is kap. PMVr: a kéztartás és a kéz-száj koordinációban fontos.

De még az M1 terület sejtjei is viszonylag sok izmot vezérelnek, illetve egy izom több területről is kaphat vezérlést. Egy izom gyakran több, ugyanahhoz az ízülethez tartozó más izmokkal kap közös vezérlést. Az M1 ingerlése összetett mozgásokat vált ki: kéznyitás, zárás, arckifejezések...

Egy példa a motoros tervezés lépcsőire.
Álmosak vagyunk, de még sokat kell dolgoznunk, de nincs kedvünk elmenni egy kávézóba. A homloklebenyünk kitalálja, hogy kávét kell csinálnunk (ehhez igénybe veszi a kéreg-törzsdúcok kört, többször is). Megszűr egy pár tervet és oda jut, hogy Nescafét csinálunk, forró vízzel (igénytelen, de ne felejtsük sok a meló). A megmaradt verziót elküldi a SMCbe, hogy dolgozza ki a kávéfőzést. Jön a hurok, és a PMC elemekre bontja a mozdulatokat. Megint jön a hurok, amiben a törzsdúcok kiválasztják a legmegfelelőbb mozdulattervet, a kisagy pedig pontosságra hangolja azt. Végül az M1 a gerincvelői mozgató idegsejteknek megmondja milyen mozdulatokhoz melyik izmokat mikor és hogyan mozgassák.



Kávét többféle módon és eltérő lépésekben lehet csinálni. Hogy milyet csinálunk az függ a hangulatunktól, a motivációnktól és a lehetőségeinktől. Ezeket a homloklebeny és a mozgató kéreg mérlegeli és dolgozza ki a mozdulatokat.

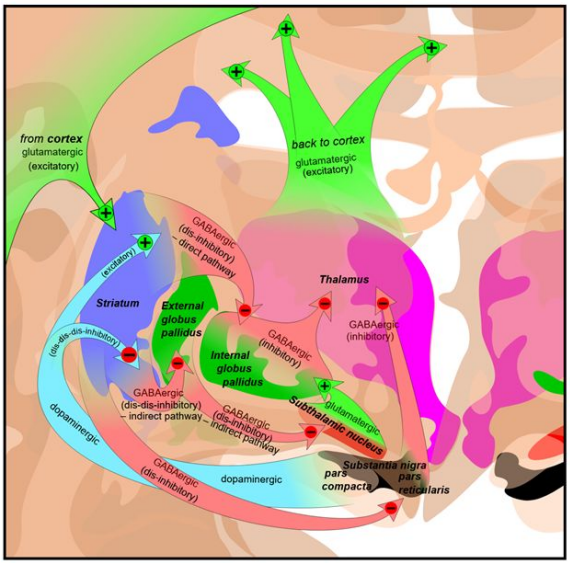
A következőkben a nem kivitelezhető terveket gátló hurkok működését járjuk körbe.

Szerző: **Gulyás Attila**

A törzsdúc- és a kisagy-kör működése I.

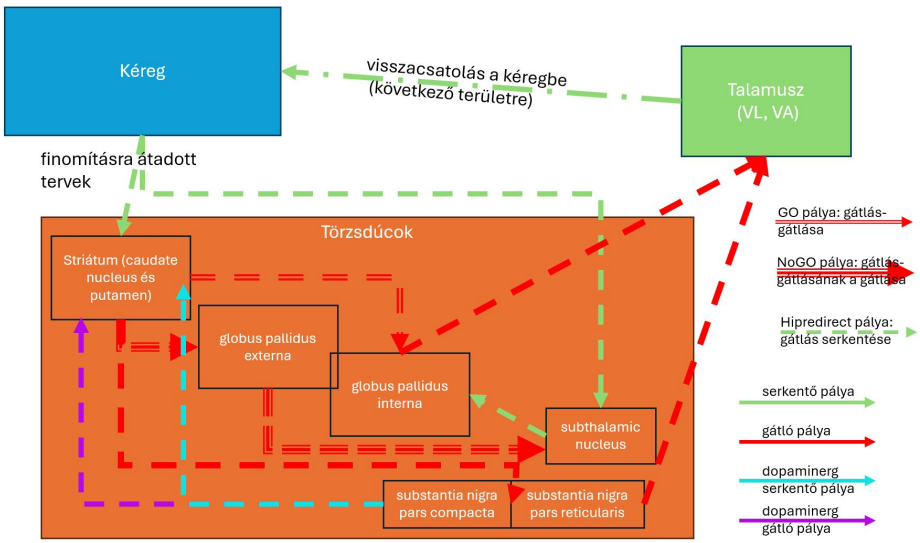
A terveket kidolgozó homloklebeny/motoros kérgek elsősorban nem egymásnak adják tovább a terveket közvetlenül, hanem a fejezetcímben szereplő agyi körökkel azokat minősíttetik is és csak az elfogadott terveket viszik tovább. Az eddigiekben csak egyszerű, ismétlődő dobozok láncolataként ábrázoltuk ezeket a rendszereket. Most belebújunk a dobozok ijesztő részleteibe, hogy megpróbáljuk megérteni, a bennük elbújtatott, akár többszörös gátlások, hogyan faragják a lehetőségeket.

A törzsdúc hurok és a kisagy hurok véleményét párhuzamosan kérdezik meg az agykérgek, akik a megfelelő talamusz mag gátlásával szűrik meg a tervet. A törzsdúc kör a tervek finomításában a kisagy kör pedig a precizitás és az időzítés kidolgozásában játszik fontos szerepet.



Ismétlésnek a törzsdúcok elhelyezkedése és igen bonyolult kapcsolatrendszere. Míg a kéreg fősejtjei serkentőek, a striátum és pallidum fősejtjei gátlósejtek.

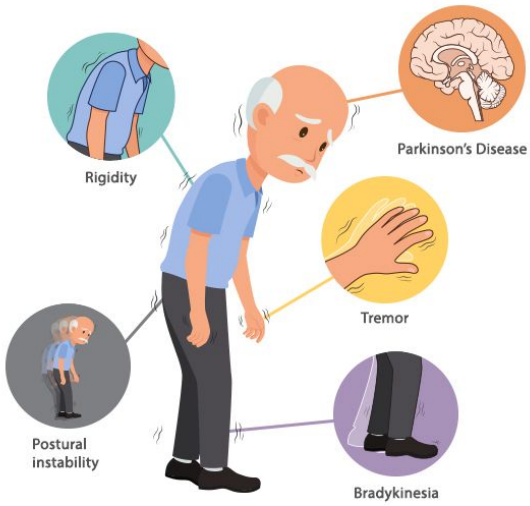
A megfelelő szintű agykéreg serkentő kapcsolatok útján másolatokat küld a kidolgozott tervekről a striátum (CN és P) megfelelő területeire.
A striátumból két pálya indul tovább. Az egyik, a közvetett vagy indirekt pálya gátló. NoGo, azaz NemMehet pályának is mondják. Ez gátolja a GPe-t ami a GPi gátlásának gátlását (serkentését) okozza, és mivel ez egy gátló mag, gátolni fogja a talamuszban a tervet. Mivel a GPe gátlása felszabadítja az STN-t, aki serkenti a gátló GPi-t párhuzamosan szintén gátolja a talamuszt. A másik pálya, a közvetlen vagy direkt pálya. Go, azaz Mehet pályának is hívják. Ez a pálya gátolja a GPi-t és ezáltal megengedi a talamusz aktiválódását. Az SNpC-ből eredő dopamin tartamú bemenet serkenti a direkt (Go) pályát és gátolja az indirekt (NoGo) pályát, azaz a dopamin felszabadulása támogatja egy-egy terv megvalósulását.



A törzsdúcok belső kapcsolatrendszere. Egy adott kéregterületről érkező terveket megszűrik és a feldolgozási láncban következő kéregterületnek továbbítják. A magok közötti bonyolult gátló-gátló, gátló-serkentő útvonalakon 3 úton haladhat az információ a GO, a NoGo és a hiperdirekt pályákon, melyek más aspektudból vizsgálják és vétózzák vagy hagyják jóvá a terveket. Részeletek a szövegben.

A spontán (reaktív, inger kiváltott), illetve a célirányos (szándék, tervezés) viselkedések során, a direkt és az indirekt pálya idegsejtjei egyszerre támogatják és nyomják el a viselkedés egyes elemeit. Az a viselkedés nyer aki a legtöbb támogatást és legkevesebb gátlást kapja.
És van itt még egy útvonal a rendszerben, melynek fontos eleme az STN. Ezt hiperdirekt pályának hívják, mivel az STN közvetlenül kap terveket, serkentő bemeneteket a motoros kérgekből (elsősorban a PMC és M1 régiókból) és serkentő kimeneteivel hajtja a GPi gátlását, ezzel gyorsan befolyásolja, hogy a mozgás megvalósul-e vagy elnyomódik. Gyakorlati jelentősége hirtelen, nem kívánt mozgások gyors gátlása (pl. hirtelen megállás, "vészfék"),

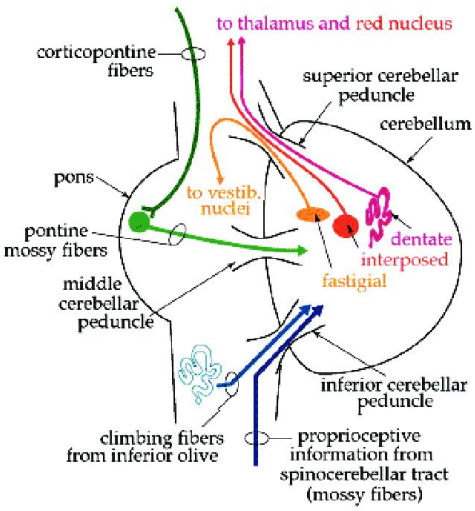
ha például új környezeti inger ezt indokolja. De az STN nem csak motoros, hanem kognitív és limbikus hurkokban is részt vesz, pl. döntéshozatalnál, impulzuskontrollnál.



Parkinson kórban a dopaminerg rendszer pusztulása a striátimból induló GO és NoGO pályák közötti egyensúly felbomlása miatt a mozgás részleges vagy teljes gátlását eredményezi.

Parkinson-kórban, dopaminhiány miatt egyrészt csökken az indirekt (NoGO) pálya gátlása, másrészt a direkt (Go) pálya serkentése, harmadikként az STN túl aktívvá válik, mely fokozza a GPiből eredő gátlást. Ezek mind csökkent mozgást és motivációt eredményeznek. Mivel a dopaminerg rendszer a tervezés minden lépcsőjében fontos - mint azt a Mozgástervezés hierarchiája részben említettük- Parkinson-kórban nem csak a mozgástervezés, hanem a dolgok végiggondolásának menete is zavarokat szenved.

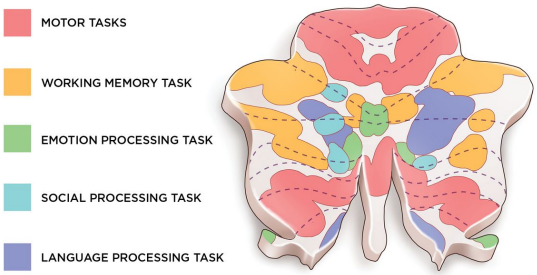
A kisagy környél hasonlóan serkentő tervmásolatok kerülnek be a rendszerbe és kimenetként gátló mintázatok érkeznek ugyanazokra a talamusz sejtekre ahova a törzsdúc kör gátló kimenete is érkezik. A finomításhoz a kisagy nem csak a kéregtől érkező terveket kapja, hanem a testérző rendszertől megkapja az izmok, ízületek helyzetét, az egyensúlyozó rendszerből pedig térbeli helyzetünket, melyek alapján pontosítja és időzíti mozgásainkat. Jeleket kap még az agy készenléti rendszerétől a retikuláris formációtól is, mely az éberségről, tónusról és motivációról szolgáltat adatokat. Ezeket integrálva hagyja jóvá mit, milyen sorrendben és pontosan milyen időzítéssel tehetünk.



A kisagy az agykéregből érkező tervek mellett az egyensúly rendszertől és a gerincvelőből is kap információt a test helyzetéről.

> Kedvenc példám a szabad akarat létezése ellen. Ülj fel a biciklire, indulj el majd határozd el hogy elesel. „Valami érthetetlen erő" ezt nem fogja hagyni, nem leszel képes akaratlagosan elesni. Nos ez a valami a kisagy.

A kisagyról először azt gondolták, hogy csak a mozgástervezésben játszik szerepet, ugyanis károsodása pontatlan, rosszul időzített mozgásokat okoz. De finomabb vizsgálatok (pl. funkcionális MR) kiderítették, hogy a gondolkodás során is bekapcsol. Fontos szerepe van még a beszédben is, mind az értésben, mind a képzésben. Egy elhangzó mondat megértésének már a kezdetén megkeresi, hogy az milyen szerkezet lehet és hogyan folytatódhat, beszéd esetén pedig a mondatok helyes szórendjének (szintaxis) összeállításában fontos. Mivel az igék fontosabb szerepet töltenek be ebben, mint a főnevek, az igék helyes használatát segíti elő (a főnevek jelentésének értelmezését a bal



A kisagy nem csak a mozgástervezésben vesz részt, hanem a homloklebenynek és a limbikus kérgeknek is besegít. A kisagy kiterített felszínén színek jelölik az egyes területek minek a feldolgozásában vesznek részt. A mozgásfeldolgozás mellett (piros) a kisagy a memória (sárga), az érzelmek (zöld), a társas kapcsolatok (szürke) és a nyelv feldolgozásban is segíti az agykérget.

homloklebeny végzi). Részt vesz az igeidők, módok és személyek értelmezésében. A kisagy károsodása esetén a beszédképzésben elsősorban igékkel kapcsolatos problémák merülnek fel.

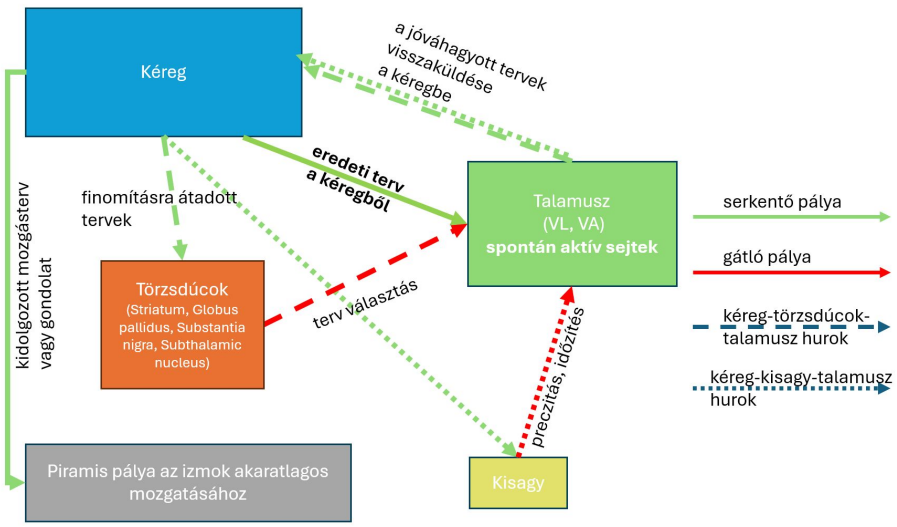
Szerző: **Gulyás Attila**

A törzsdúc- és a kisagy-kör működése II.

A körök utolsó lépéseként a párhuzamosan érkező gátló törzsdúci és kisagyi hatások (melyek a tervek finomítását és a mozgások precízebbé, pontosabbá csiszolását okozzák), a talamusz (VL/VA) szintjén hatnak kölcsön az agyi tervekkel, majd innen egy serkentő pályán továbbítódnak a feldolgozásban következő agyterületekre.

No de honnan ered a talamikus magok (VL/VA) kéreg felé induló aktivitása, mitől sülnek ki a sejtek? Ha csak gátlást kapnak ezek a magok, akkor mitől aktívak?

Egyrészt nem csak gátlást kapnak, hanem serkentést is a kérgi területektől, másrészt a talamusz sejtjei, hajlamosak a spontán kisülésre. Ha nem gátolják őket maguktól is aktiválódhatnak és jeleket küldenek a kéregbe. Ebben a rendszerben tehát a gátlás kikapcsolódása vezet aktiválódáshoz, de erre még rásegíthet a kéregből érkező serkentés.

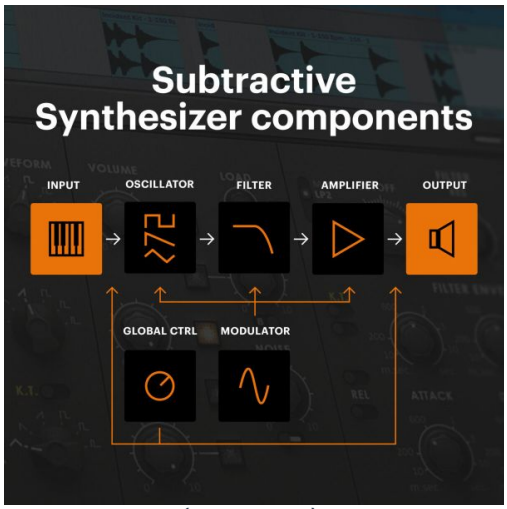


A jóváhagyó körök kicsit finomított ábrája. A talamusz magok (VL/VA) egyrészt serkentő bemenetként (zöld nyíl) megkapják a terveket a kéregből, másrészt a talamusz sejtjei maguktól is

hajlamosak kisülni. A körökből jövő gátlások elhallgattatják azokat a sejteket akik a rossz tervekben vesznek részt. Megmaradnak azok a sejtmintázatok (tervek) amelyeket nem gátolnak a törzsdúcok és a kisagy mintázatai.

A dolog valahogy úgy működhet, hogy az egyes lehetséges tervek megvalósítását kódoló sejtek kapnak egy agykérgi serkentést, de csak azok (Mit?) és akkor (Hogyan? Mikor?) tudnak megszólalni akikről leesik a gátlás. Azok a sejtek akik azokban a tervekben vesznek részt amelyek nem jók, gátlást kapnak a törzsdúc és a kisagy körökből. Amikor ez megtörténik a megfelelő megoldás eljut a kéregbe, hogy aztán a piramidális és extrapiramidális pályán keresztül eljusson a motoneuronokon keresztül az izmokhoz.

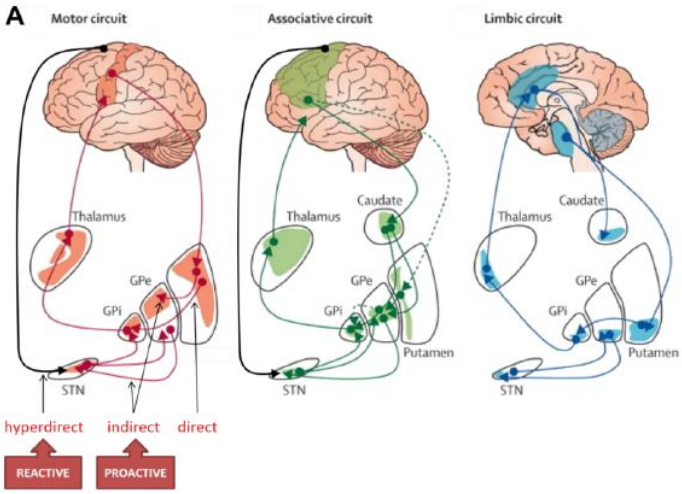
Szentágothai János Funkcionális Anatómia könyvében használta azt a hasonlatot, hogy a kisagy (és a törzsdúcok is) úgy működik, mintha egy fordítva működő orgonán játszanánk. Alaphelyzetben az orgona minden hangja szól. Egy dallamot úgy tudunk előállítani, hogy minden hangot gátlunk (lenyomjuk a megfelelő, fordítva működő billentyűt), kivéve azokat amelyeket meg akarunk szólaltatni. No persze ehhez 10 ujj nem lenne elég. A gépi beszéd szintetizátorok és elektronikus zenék is használják ezt a szubsztraktív (kivonó) technikát. Kiindulnak egy fehér zajból vagy egy hullámgenerátor jeléből, mely minden (vagy sok) frekvenciát tartalmaz, és különböző szűrőkkel eltávolítanak belőle frekvenciákat, ezzel „faragják" a hangot, mint ahogy egy szobrásznak is „csak" le kell faragnia a felesleges követ a szoborról, hogy elkészüljön a mű.



A kivonásos (subsztraktív) hangszintézis folamatábrája. A zenész azt vezérli, hogy egy minden hangot tartalmazó fehér zajból vagy hullámgenerátorokból származó hangból a digitális hangszer szűrői mely hangokat és milyen mintában távolítsanak el, a megmaradó hangokat adja ki a hangszer. Hasonlít mozgástervezésünkhöz, ahol az agykéreg által felajánlott lehetőségekből a szabályozó körök meghagyják a működőképes lehetőségeket.

A rendszer párhuzamosságában benne van még egy dimenzió. Többféle dolgot tervezünk. A tervek a fent leírt lépcsőkön keresztül alakulnak ki és jutnak el a megvalósításig, de terveinknek mások a kiindulási pontjai, ingerei, gyökerei. Mint láttuk a homloklebeny darabolásánál, eltérő területek eltérő forrásból származó ingereket dolgoznak fel, eltérő szempontok szerint. A pszichológusok 4 párhuzamos csatornát írtak le. Van az akaratlagos mozgástervezés (1): ez az SMCt, PMCt, és az M1 útvonalon zajlik. De például szemmozgásaink tervezésére (2) van egy külön hasonló csatorna, mely a frontális szem mezőből indul. Van aztán egy gondolkodási csatorna (3), mely a dorsolaterális (felső-oldalsó) homloklebenyből indul és fontos a döntéshozatalban és a munkamemóriában. Végül van egy limbikus (érzelmi, 4) csatorna is, mely az ACC-ből (elülső övtekervény) és az orbitofrontal kéregből indul, és az érzelmek, motivációk és jutalom-alapú tanulás csatornája. Az utóbbi két csatorna eredménye aztán persze rácsatolódhat a mozgástervezés csatornájára. Az egyes csatornák (mint korábban pedzegettük) a törzsdúcok eltérő részein „futnak".

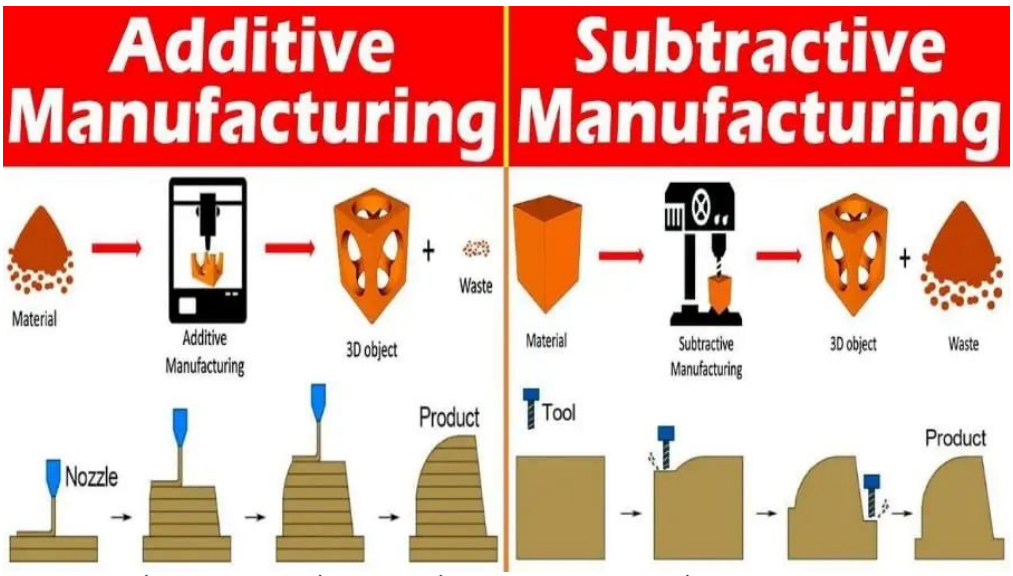
A hangszintézis példánál jutott eszembe egy párhuzam, mely összefoglalásnak jó lehet. A modern gyártási technológiákban megjelentek az additív és szubsztraktív, azaz hozzáadó és elvevő technológiák. Additív a 3D nyomtatás, ahol számítógép vezérelt módon mozgó adagolófejből kerül az anyag a kívánt helyre. Szubsztraktív egy CNC maró vagy egy lézervágó, ahol a meglévő anyagból forgácsolással vagy lézerrel távolítják el a nem szükséges részeket. Manapság sok esetben a két technológia egymást követi.Így jelentősen



A kéreg-törzsdúcok hurkok 3 párhuzamos szála, melyek a mozgások, gondolatok és érzelmek szabályozásában játszanak szerepet. A szövegben említett 4. szál a szemmozgás szabályozása itt nincs feltüntetve. A szálak más kéreg és törzsdúc területeken futnak végig, de a fent vázolt alapelveket figyelembe véve.

kevesebb anyag és energiafelhasználással, egyetlen geometriailag jóval bonyolultabb, számítógéppel, akár evolúciós algoritmusokkal tervezett alkatrészt is elő lehet állítani. No a mozgástervezésben az agyban is először egy hozzáadó (additív) lépés történik az agykéregben és ezt egy kivonó (szubsztraktív) lépés követi.

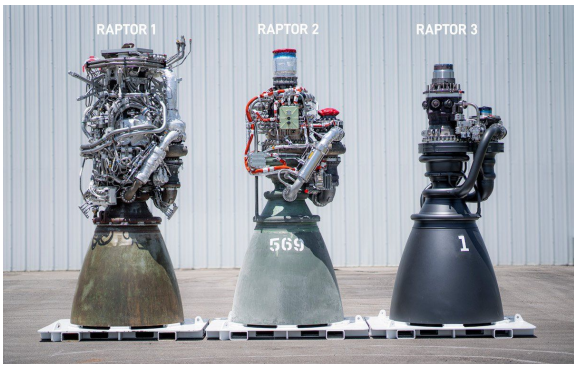
És ha már a visszacsatolás dícséretéről szólt ez a fejezet. Hol is voltak itt visszacsatolások? Egyrészt ugye még kishálózat szinten az egyes agykérgi területeken található oszlopok rétegei között. Azután vannak ugye a kéreg-tözsdúcok/kisagy-talamusz körök (amikben mellesleg csak



A hozzáadó (bal oldal, additív) és kivonó (jobb oldal, szubsztraktív) gyártási technológiák például a 3D nyomtató és a CNC maró, mely anyagot ad hozzá vagy távolít el a munkadarabból. Így igen bonyolult alkatrészek állíthatók elő anyag és energiatakarékosan.

előrecsatolt hálózatok vannak). És hát visszacsatolás létezik a kérgi területeke között is. Visszacsatolások nélkül nem tudnánk finomítani döntéseinket és nem lennének belső állapotaink, csak a külvilág ingerei váltanának ki egyszerű válaszokat.

Huhh. Hát az egyik legbonyolultabb rendszerrel megvagyunk. Azért van még. A következőkben a memóriákról és a tanulás köreiről lesz szó.



A SpaceX raptor hajtóművek evolúciója, melyet a 3D nyomtatás tett lehetővé. A bal oldalon látható több ezer alkatrészt tartalmazó rakétahajtóművet a 3D nyomtatás felhasználásával súlyban, összetettségben, teljesítményben és előállítási költségekben jelentősen kedvezőbb megoldás váltotta fel (jobb oldal).

Szerző: **Gulyás Attila**

A visszacsatolás dícsérete IV.: A tanulás hurkai

Az elmúlt hetekben az agyi hálózatok talán egyik legbonyolultabbjának, a tanulási rendszernek a viselt dolgait szedtem össze. Belecsapunk egy sorozatba, mely bemutatja hogyan tanul agyunk.

Történetünk veleje, hogy az agy egy több szerveződési szintet magában foglaló többszörösen összetett alaposan visszacsatolt hálózat.

Az eddigiek során megbeszéltük hogyan működnek az idegsejtek, hogyan és milyen tulajdonságokkal rendelkező hálózatokat alkotnak. A PDP alapállításai szerint (lásd a galériát a cikk végén):

1) a jelen az idegsejtek mindenkori aktivitás mintázata, ezzel reprezentáljuk, kódoljuk a világ történéseit,

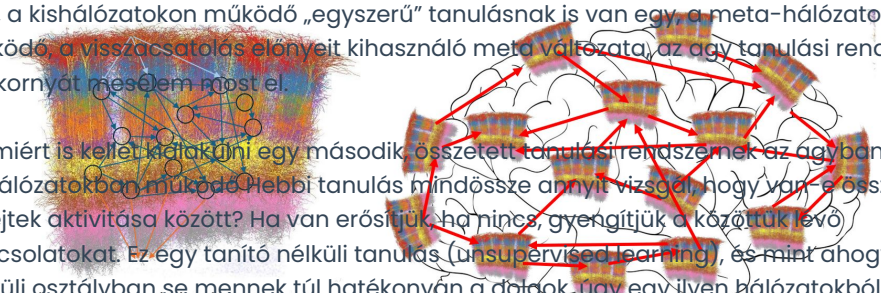
2) a múltat, a memóriát, a tudást, a sejtek közötti kapcsolatok, a szinapszisok erőssége tárolja,

3) a hálózat aktivitásának fejlődését, következő állapotát, a jövőt (információ feldolgozása, a gondolkodás) az határozza meg, hogy az éppen aktív idegsejtek (jelen) szinaptikus kapcsolataik alapján (múlt) mely más idegsejteket aktiválnak (jövő, tervek) és végül,

4) a tanulás, új memórianyomok kialakulása, a szinaptikus súlyok megváltozása az asszociatív Hebb szabály alapján. A kishálózatok szintjén ez egyszerű, ha két idegsejt egyszerre aktív akkor a közöttük levő kapcsolatok megerősödnek.

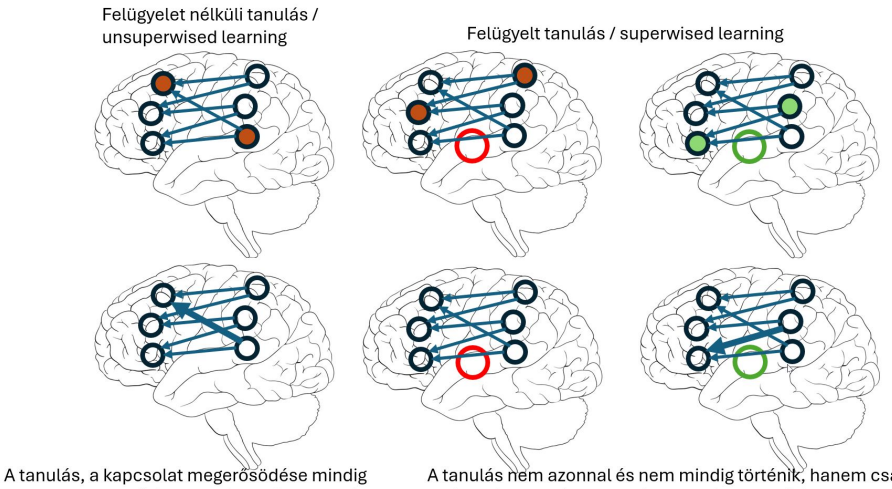
Az egész agyat tekintve a tanulás és a memória azonban ennél jelentősen bonyolultabb. Mint kifejtettük, az első szintű hálózatok, melyek az egyes agyi magvakat és agykérgi területeket felépítő kérgi oszlopokat alkotják, egy magasabb szintű, másodlagos hálózatba szerveződnek: az agyi területek hierarchkusan összekapcsolt meta-hálózatába. Az egyes kishálózatok egy-egy feladat megoldására szakosodtak és kölcsönhatásukból áll az információ magas szintű feldolgozása, a cselekvési tervek kovácsolása és a magasabb szintű mentális folyamatok. Láttuk azt, hogy mindkét szinten nagyon fontosak a visszacsatolások, mert káprázatos új képességek megjelenését teszik lehetővé.

Nos, a kishálózatokon működő „egyszerű” tanulásnak is van egy, a meta-hálózatokon működő, a visszacsatolás előnyeit kihasználó meta változata, az agy tanulási rendszere. Ezt a cikornyát mesélem most el.



De miért is kellet kialakúlni egy második összetett tanulási rendszernek az agyban? A kishálózatokban működő hebbi tanulás mindössze annyit vizsgál, hogy van-e összefüggés a sejtek aktivitása között? Ha van erősítjük, ha nincs, gyengítjük a közöttük levő kapcsolatokat. Ez egy tanító nélküli tanulás (unsupervised learning), és mint ahogy a tanár nélküli osztályban se mennek túl hatékonyan a dolgok, úgy egy ilyen hálózatokból felépült agy sem tanul a leghatékonyabban. Miért? Mert mindig tanul, mert nem tudja mikor kell tanulni és mikor nem. Azt is megtanulná, amikor a hálózat valamilyen összefüggés megoldásként.

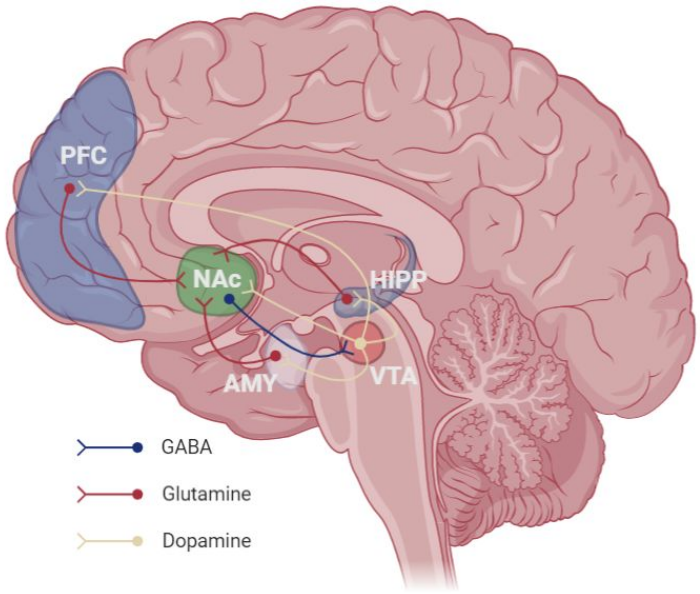
A híres orosz neuropszichológusnak Alexander Romanovics Lurijának (számos olvasmányos könyve jelent meg magyarul, ajánlom mindenkinek őket) volt egy betege, aki rendkívüli emlékezett. Emlékezett az utcán minden házra, minden ablakra, hány alma volt a zöldséges ládájában, milyen színű lovak húzták a szekeret az utcán. Ez egy hasznos tulajdonságnak tűnik. De nem az, mert a beteg életének lényeges élményei megfulladtak a sok apró tény között, életképtelen volt. Nem tudta a fontosat a lényegtelentől megkülönböztetni, mert valahol valami rosszul volt kapcsolva az agyában.



A felügyelet nélküli és a felügyelt tanulás összehasonlítása.

A hatékony tanuláshoz szükség van tehát egy rendszerre, ami képes a tanulást ki vagy bekapcsolni (a dolgok jelentőségét súlyozni), annak alapján, hogy ami éppen történt az jó vagy rossz, pontosabban, jobb-e vagy kevésbé rossz, mint korábban. Mert ha a megoldással jó irányba mozdultunk, akkor azt nagyon érdemes megjegyezni, ha nem akkor inkább felejtsük el. Ha teljesen lényegtelen nincs mit tanulni, közömbös.

Mi kell mindehhez? Először is fel kell ismernünk, hogy jobb lett-e valami? Ehhez tudnunk kell mi volt korábban és mi van most. Azaz emlékeznünk kell, szükséges egy (vagy több) memória. Ezután össze kell hasonlítanunk a múltat a jelennel, hogy tudjuk a változás irányát. Majd ha jóra fordultak a dolgok, akkor az agy kishálózatainak meg kell mondani, hogy „tessék megjegyezni azt amit éppen csináltál”! Ehhez összehasonlításokra és visszacsatolásokra van szükség, de mint láttuk ez akad bőven az agyban. Az ilyen kiértékelésen és visszacsatoláson alapuló tanítást hívják felügyelt tanulásnak, azaz supervised learning-nek. Ez az amit az agy bonyolult meta-tanuló rendszere megvalósít.
A továbbiakban először röviden összefoglalom a dolgok menetét, majd aprólékosan is végig megyünk a rendszereken. Kicsit nehéz a helyes sorrendet felépíteni, mert alaposan



A jutalmazási rendszerben résztvevő területek. A VTA (ventral tegmental area) dopaminerg sejtjei jelzik menyire sikeres a próbálkozásunk. A dopamin a homloklebenyben, a hippokampuszban, az amigdalában és a NAc (nucleus accumbens) területén hatva, sikeres esetben, beindítja a tanulást, örömet és sikerélményt vált ki.

összefonódnak a dolgok. Ugyanis a memóriatípusok, a tanulási módok és a jutalom rendszer alaposan egymásba gabalyodik, ráadásul még a döntés/ gondolkodás (az előzőekben leírtak) sem válnak el a kiértékelő/ jutalmazó rendszertől és a memória kialakulásától.

A memóriák típusaival és időbeli felbontásukkal kezdjük. Merthogy nem egyféle memória van az agyban, hanem többféle, a bonyolult feldolgozási és tervezési hierarchia minden szintjéhez társulnak különböző típusú memóriák.

Utána megnézzük pontosan milyen típusú tanulások vannak, ezek mely memóriarendszerekben zajlanak. Ezután tárgyaljuk talán a legbonyolultabb részrendszert, a jutalmazási rendszert. Ez a rendszer dönti el mikor és mit tanuljunk és mit nem. Ebben számos agyterület hat kölcsön. Agyunknak ki kell számolnia, hogy egy ingerre vagy cselekedetre adott válasz eredménye jó vagy rossz eredménnyel járt-e, pontosabban, hogy jobb lett-e az eredmény mint amit vártunk. Össze kell vetni cselekedeteink eredményét az elvárttal. Azaz, korábbi tapasztalataink alapján (memória, múlt) egy bonyolult jóslatot kell tenni, majd el kell döntenünk, hogy ez jobb-e vagy roszabb mint amit tapasztaltunk (érzékelés, jelen). Ha jobb, akkor a jutalmazási rendszer dopamint szabadít fel az agy számos részén. Agyunk ezzel adja áldását a tanulásra, és egyúttal azt is jelzi, hogy örüljünk, remek tudásra tettünk szert, érdemes volt próbálkozni, mert a próba sikeres volt. Az utolsó részben azt mutatjuk be, hogy a jutalmazási rendszer dopamin pecsétje által jóváhagyott dolgok hogyan rögzülnek végül a memóriában. Hogyan történik meg a Hebbi társításos tanulás az érintett memória rendszerekben az egyes agyterületeken.

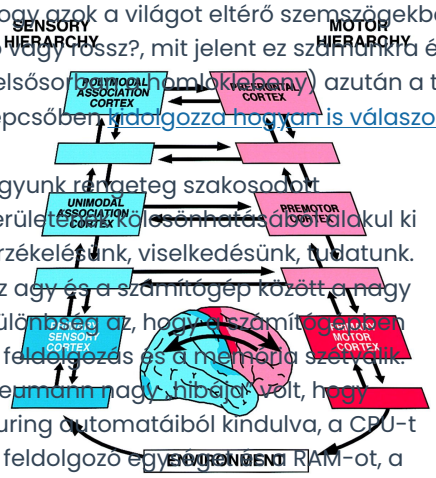
Szerző: **Gulyás Attila**

Az emlékezés labirintusa: a memória fajtái

Mint láttuk, agyunk nagy hálózata megfelelően összekapcsolt, információfeldolgozásra szakosodott kishálózatokból (agykérgi területek) épül fel több szintben, visszacsatoltan.

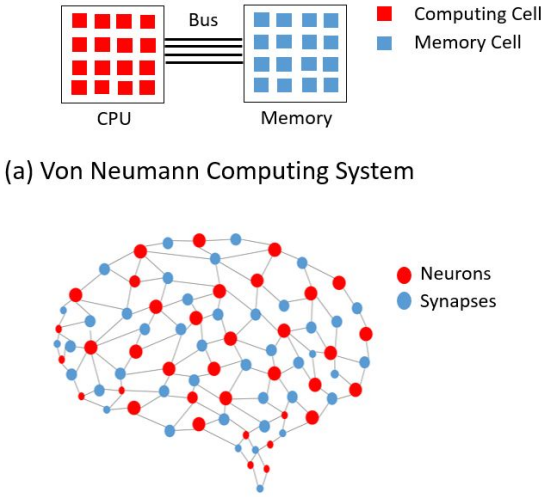
Bemutattuk, hogyan épülnek egymásra a különböző modalitásokat (érzékszervi csatornákat) feldolgozó elsődleges, másodlagos és asszociációs kérgek, melyek a világot egyre absztraktabban képezik le (reprezentálják), hogyan futnak össze az érzetek egy multimodális reprezentációba a hippokampuszban, az amigalában és a homloklebenyben,

hogy azok a világot eltérő szemszögekből megvizsgálják (milyen szituációban vagyunk?, ez jó vagy rossz?, mit jelent ez számunkra és mi lehet a megoldás?). Ezen három terület (elsősorban homloklebeny) azután a törzsdúc és a kisagykör segítségével megint több lépcsőben kidolgozza hogyan is válaszoljunk a világ kihívásaira.



Az érzékelés-válasz hierarchiája. A csúcson a homloklebeny áll.

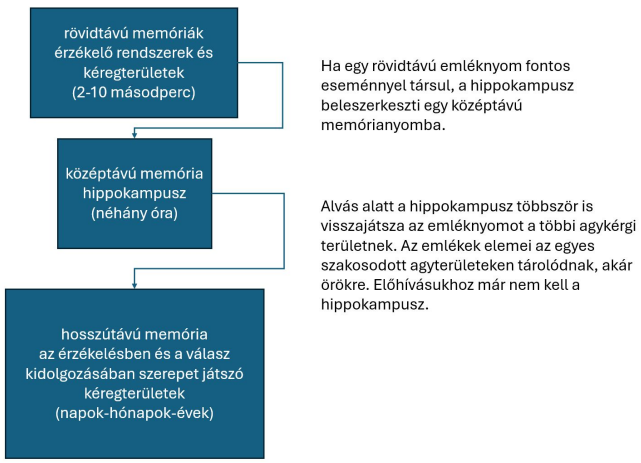
Agyunk rengeteg szakosodott területe kölcsönhatásából alakul ki érzékelésünk, viselkedésünk, tudatunk. Az agy és a számítógép között a nagy különbség az, hogy a számítógépben a feldolgozás és a memória szétválik. Neumann nagy hibája volt, hogy Turing automatáiból kindulva, a CPU-t a feldolgozó egységnek, a RAM-ot, a memóriát szétválasztotta onnantól megalkotta az első digitális számítógépet. Nos az agy, mivel egy idegsejt hálózat (lásd Konnekcionizmus), a feldolgozás és a memória nem válik el egymástól. A feldolgozás maga az, hogy egy idegsejtmintázat a szinaptikus súlyoknak megfelelően egy másik mintázatot vált ki. Tehát az agy a különböző feladatok megoldásához alapul szolgáló memóriát helyben tartja. Ennek következménye, hogy minden agyterület egyben egy memória is.



A Neumann féle számítógépekben (amiket naponta használunk) a feldolgozás és a memória külön áramkörökben zajlik. Az agyban a feldolgozás és a memória nem válik el. A következményeket lásd a szövegben.

> Sok más előnye is van az elosztott architektúrának. Egyrészt a neuronhálóknak nem kell adatért messzire rohangálniuk, másrészt, mivel a feldolgozás szétszórtan történik, ezért mindenhol párhuzamosan zajlik. Bár az egyedi idegsejtek sebessége jelentősen lassabb mint a számítógépben a logikai kapuké, az erős párhuzamosság miatt az agy információ feldolgozása nagyon gyors. Nem kell várni az adatokra, és sokmillió párhuzamos számítás folyik az agykérgi oszlopokban.

Ezeknek a memóriáknak a felsorolása lesz majd az első.



A memória rögzülésének fázisai.

De a memóriáknak van egy másik vonása is: különböző időablakokban működnek. Van rövid, közép és hosszútávú memória, amelyek megfelelő körülmények esetében egymásnak adják a fontosnak talált és tárolandó információt. Erről lesz szó másodszorra.

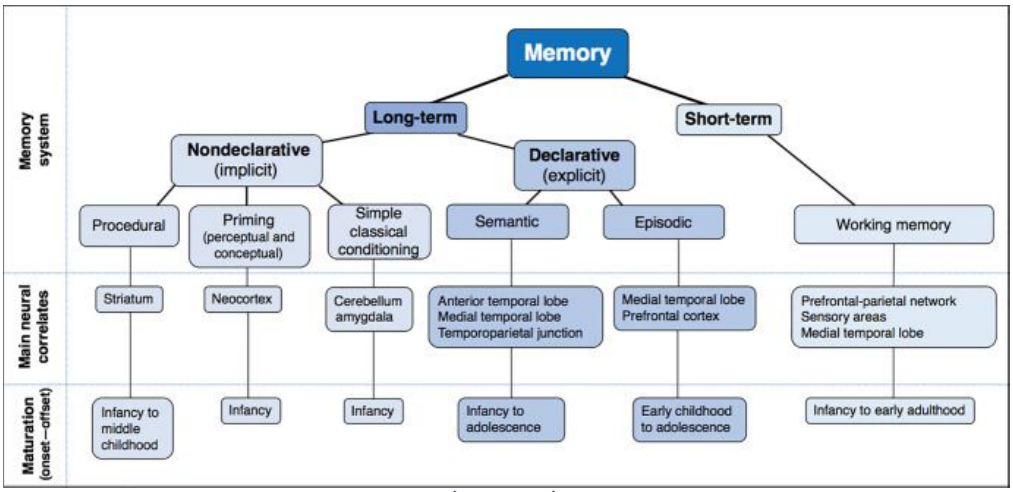
Az emberi memória ráadásul bonyolultabb is mint az egyszerűbb lényeké (pl. tengerimalac), mivel többféle agykérgi területünk van. Az emberben a homloklebeny

megjelenésével kialakult a rövid időtávon működő, de az összetett, tervező gondolkodás képességét adó munkamemória és a hosszútávú memóriákban is magasabb szervezettségben tárolódnak a dolgok.

Szerző: **Gulyás Attila**

A memória típusai

A pszichológusok az első vágást hosszútávú memóriákon annak mentén teszik, hogy tudjuk-e, el tudjuk-e magyarázni amit tanulunk vagy pedig reflex, készség szintem tanulunk és nem tudjuk elmagyarázni, legfeljebb megmutatni.

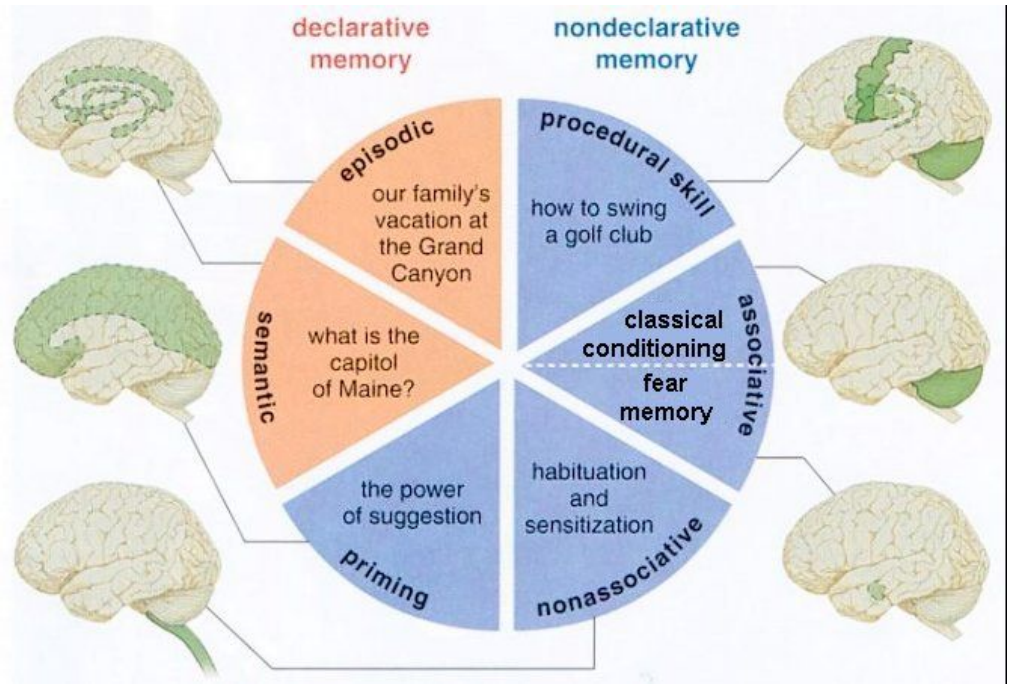


A tanulás és memóriarendszerek típusai (felső rész), mely agyterületek vesznek részt az egyes memóriatípusok feoldolgozásában (közép) és melyik mikor alakul ki (alul). Részletek a szövegben.

1. Nem-deklaratív (implicit) memória

Ez nem tudatos tanuláson alapul, és a viselkedésben tükröződik anélkül, hogy az egyén tudná vagy meg tudná fogalmazni, mit tanult meg. Automatikus, gyakran ingervezérelt. Jellemzően tapasztalásból származik, nem utasításból. Alapja gyakran megerősítés vagy ismétlés, nem egyszeri alkalommal rögzül.

Altípusai:
1. Procedurális memória: Motoros és kognitív készségek, szokások. Pl.: biciklizés, zongorázás, vakon gépelés. A striatum, a motoros kéreg és a kisagy vesz részt ebben a tanulási típusban.
2. Priming (előfeszítés): Egy inger feldolgozása megkönnyíti egy másik későbbi inger feldolgozását. Pl.: Egy szót gyorsabban ismerünk fel, ha korábban láttuk. Az érző és asszociációs kérgek vesznek benne részt.
3. Klasszikus kondicionálás: Egy semleges inger összekapcsolódik egy reflexes válasszal: csengőszó nyálelválasztást vált ki. Az amigdala (félelem) és a kisagy cerebellum (motoros válasz) vesz benne részt.
4. Habituáció (hozzászokás), szenzitizáció (érzékenyítés): Egyetlen ingerre adott válasz módosulása. Részt vesznek benne a reflexívek, az agytörzs és a gerincvelő
5. Affektív tanulás / érzelmi kondicionálás: Érzelmi jelentőség asszociálódik semleges ingerekhez. Például egy színhez félelem társul, ha mindig büntetés követi. Az amigdala és a hipotalamusz vesz benne részt.
6. Szemantikus procedurális szokások: Válaszminták, amit nem tudunk megindokolni, de működnek. Gyakran használt szófordulatok, nyelvtani sémák. A törzsdúcok és a bal premotor kéreg felelős érte.



A nem deklaratív és deklaratív memóriák és az értük felelős agyterületek.

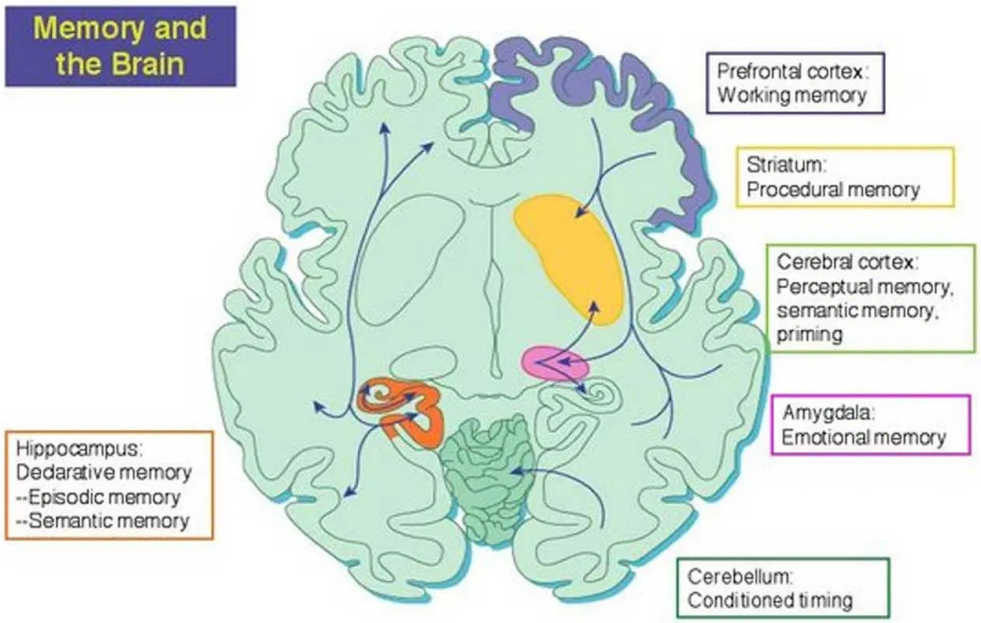
2. Deklaratív (explicit) memória

Az a memóriaforma, amelynek tartalma tudatosan felidézhető, el tudjuk magyarázni, és gyakran egy adott időponthoz vagy kontextushoz köthető. Ezt a memóriát használjuk, amikor emlékszünk valamire, szemben a nem-deklaratívval, ahol csak tudunk valamit csinálni. Asszociációs jellegű – tartalom, idő és kontextus összekapcsolása, a pillanat élményének emléke. Hippokampusz-függő (különösen a kezdeti szakaszban). Sérülhet amnéziás állapotokban (pl. anterográd amnézia).

Altípusai:
1. Epizodikus memória: Személyes események emlékezete, idő-tér kontextussal. Pl.: Tegnap találkoztam a barátommal a kávézóban. A hippokampusz, a mediális temporális (középső halánték) lebeny, és a homloklebeny fontos ennek tárolásában.
2. Szemantikus memória: Tények, fogalmak, általános tudás, nyelv. Pl.: a Duna Európa második leghosszabb folyója. Helye a laterális temporális (oldalsó halánték) lebeny, inferior parietális (alsó fali) lebeny, homloklebeny.
3. Autobiografikus memória: Személyes múlt és általános tudás keveréke. Hol születtem, milyen volt az iskolám? A hippokampusz és a szemantikus hálózatok (homloklebeny részei).
4. Forrásmemória: Annak emlékezete, honnan tudunk valamit. Pl.: „Ezt a hírt egy cikkben olvastam, nem a rádióban hallottam". Homloklebeny, hippokampusz.
5. Kontextusmemória: Környezeti részletekhez kötődő emlékezet. Pl.: Milyen színű volt a szoba, ahol tanultam. A parahippokampális kéreg és a hippokamusz fontos ehhez.

A korábban bemutatott HM esete jól szemlélteti a kétfajta memória szétválását. Bár hippokampuszának eltávolítása miatt anterográd amnéziában szenvedett, azaz semmilyen új tényt, adatot, személyt nem volt képes megtanulni, megismerni, viszont nem voltak problémái új készségek elsajátításával, sőt ha lassan is, de az amigdalához köthető érzelmi memóriája is képes volt tanulni.

Vegyük át miért is felelősek az egyes agyterületek.
Hippokampusz: Epizodikus memória formálása, új emlékek megalkotása és tárolása
Mediális temporális (középső halánték) lebeny (entorhinális, parahippokampális, perirhinális kéreg): Információ integráció, emlékezeti hálózat
Homloklebeny: Emlékek előhívása, forrás- és kontextusellenőrzés, szelektív figyelem



Az egyes memóriatípusokért felelős agyterületek.

Laterális temporális (oldalsó halánték) és parietális (fali) lebeny: Szemantikus tudás (jelentés) tárolása és előhívása
Default mode network (DMN) Belső figyelem, múltidézés, jövőelképzelés
A DMN az agy egyik legfontosabb funkcionális hálózata, és kiemelt szerepe van a belső mentális folyamatokban, különösen a deklaratív memória működésében. Egy olyan, funkcionálisan összekapcsolt agyterületekből álló hálózat, amely akkor aktív, amikor nem vagyunk célzott külső feladathelyzetben – például: amikor álmodozunk, emlékeket idézünk fel, a jövőn gondolkodunk, vagy önmagunkkal kapcsolatos mentális tartalmakat forgatunk.

Főbb részei és szerepük:
Medialis prefrontális kéreg (mPFC): Önéletrajzi emlékezés, önreferenciális gondolkodás
Posterior cinguláris kéreg (PCC) / precuneus: Emlékek integrációja, tudatosság fenntartása
Inferior parietális lebeny (IPL): Képzeleti szimuláció, kontextuskezelés
Medialis temporális lebeny (hippokampusz, entorhinális kéreg): Epizodikus emlékezet, mentális időutazás
Oldalsó temporális kéreg: Szemantikus tudás, nyelvi tartalmak integrálása
A hippokampusz–PCC kapcsolat az emlékek újrajátszásához szükséges. Felidézéskor a hálózat a tér és idő kontextust is rekonstruálja. A DMN támogatja azt a képességünket, hogy az emlékek „sajátként" való átélését biztosítsa (autonoézis). Ez fontos az önéletrajzi emlékezet és a jövő elképzelése során is.
A múltbeli tapasztalatok alapján a DMN képes alternatív jövőbeli események szimulálására. Ez a funkció különösen a model-based tanulás során fontos.

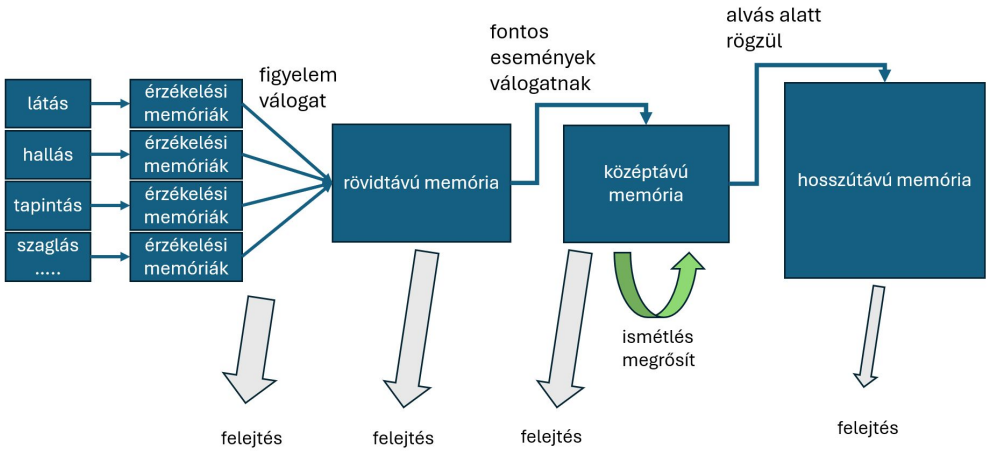
Ezzel meg is volnának a memória fiókok, most nézzük meg hogyan töltődnek meg.

Szerző: **Gulyás Attila**

A memória időbelisége, memórialánc és megerősödés

A mindennapi hatékony túléléshez a dolgokra különböző ideig kell emlékeznünk. Van amire csak egy rövid ideig (Mit hozzak a boltból? Hova tettem a bringa zárjának a kulcsát? Mik voltak a fizika feladatban a megadott értékek és mi a kérdés?), van amire örökre kell / kellene emlékezni (születési helyem, anyukám neve, a mohácsi vész

időpontja). Egy eseményről, vagy egy terv eredményének sikeréről gyakran csak utólag dől el fontos-e, érdemes-e emlékezni rá. Ezért az agy eltérő részein kialakultak különböző időtartalmú memóriák, melyek azután, hogy az információ hasznosnak bizonyult, a rövidtávú memóriákból átkerülnek a hosszabbtávú memóriákba. (korábbi cikkünk a memóriáról)



A memóriák fajtái.

Kezdjük a legillékonyabbaktól:

Érzékelési memória (sensory register):

Ezt nem mindenki különbözteti meg. Van ahol a rövidtávú memória részének tekintik, de hasznos elkülöníteni. Ez az egyes érzelmi modalitásokhoz tartozik és az éppen érzékelt dolgok részleteit tárolja. Ebből a figyelem válogatja, hogy mit használjon a rövidtávú memória.

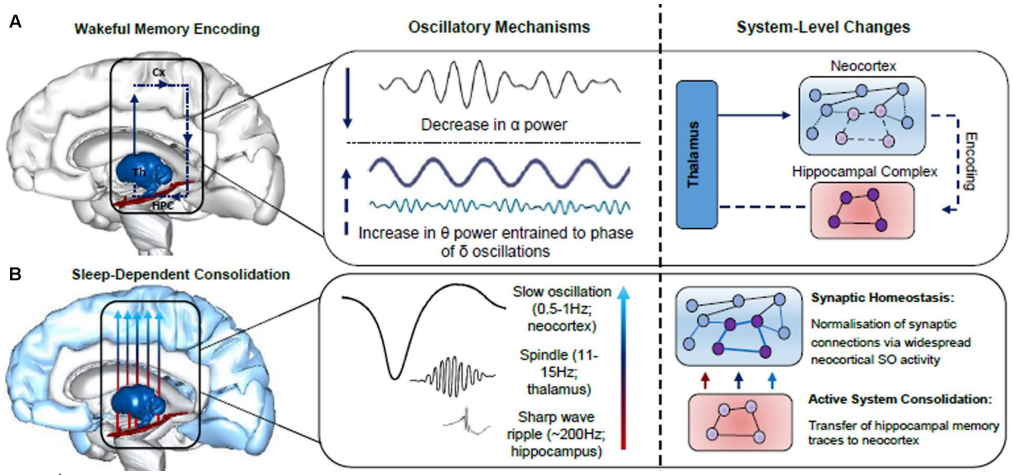
Rövidtávú és munkamemória:
Néha keverik, de a kettő nem ugyanaz. Ugyan a munkamemória is rövidtávú memória, de más a szerepük. A rövidtávú memórián azt értjük, hogy egy rövid ideig emlékszünk valamire, néhány másodpercig, amíg használjuk. Másodpercektől néhány tíz másodpercig tart, kapacitása korlátozott (klasszikusan 7±2 elem) és tudatos figyelem kell hozzá. Rövidtávú memóriák számos agyterületen találhatók: "miről van szó?" (dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) – fenntartja az információt a munkamemória részeként), "milyen volt a színe annak amit láttunk?" (szenzoros asszociációs területek, pl. látókéreg), "hol volt?" (poszterior parietális kéreg – téri információ), "a létra melyik irányban billeg?" (kisagy). Ha ezek közül valami fontosnak bizonyul, mert a jutalmazási rendszer aktiválódott, akkor átkerülhetnek majd a középtávú memóriába. Példa: Megjegyzel egy telefonszámot pár másodpercig, amíg beírod, ha fontosnak bizonyul akár meg is jegyzed majd.

A munkamemória ennél jóval speciálisabb, a homloklebenyhez kapcsolódik, azok a (gyakran összetett) dolgok vannak benne, amelyek egy döntésben, egy feladat megoldásban fontosak, kiinduló pontok. A homloklebeny a munkamemóriában levő dolgokkal tud műveleteket végezni. Sok eredmény mutat abba az irányba, hogy a mérhető intelligencia, az IQ, és a munkamemória mérete között összefüggés áll fenn. Ez lehet nem véletlen, hanem arra utal, hogy attól lehet valaki intelligensebb, mert több, a munkamemóriában tartott dolgot képes kombinálni egymással. Példa: Elvégzel egy fejszámolást fejben, miközben megtartod az átmeneti számokat.

A munkamemória is szétszórva helyezkedik el: dorzolaterális prefrontális kéreg (DLPFC) – vezérlés, manipuláció; poszterior parietális kéreg – térbeli információk fenntartása; anterior cinguláris kéreg – figyelmi konfliktuskezelés.

Középtávú memória és kialakulása (encoding):

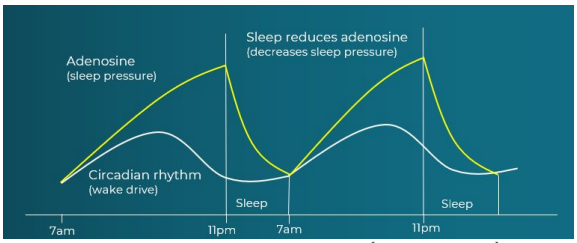
Ha egy ingert vagy egy cselekedetet követően aktiválódik a jutalom rendszer (fontosnak ítéltetett meg ami történt, erről lejjebb), akkor a cselekedettel összefüggő rövidtávú memórianyomokat és a szituáció elemeit a hippokampusz középtávú memórianyomokba szereli össze. Ezek már modalitás függetlenek, az elemek összefonódnak. Ezt a folyamatot hívják memória kódolásnak (memory encoding). A hippokampuszban gyűlnek a nap során az újonnan tanult dolgok. Perc–órás skálán működik, fontos a megerősítés a megtartásában. A tanult anyag már nem csak prefrontálisan raktározódik, de még hippokampusz-függő.
Példa: A reggel tanult anyagra délután még emlékszel, de estére elfelejted, ha nem ismétled át.



A) Nappal a fontos tapasztalatainkból a talamusz, agykéreg, hippokampusz körben áramló információból kialakulnak a tárolandó emléknyomok, a hippokampuszhoz köthető középtávú memóriában. B) Alvás alatt a hippokampuszban tárolt emléknyomok visszajátszódnak és elemeik az egyes agykérgi területekhez tartozó hosszútávú memóriákban rögzülnek. Bal oszlop: az információ áramlása az agyban. Középső oszlop: az egyes információ áramlásokat elősegítő EEG ritmusok. Jobb oszlop: Az információ áramlások sémája.

A hosszútávú memória és rögzülése (consolidation):
Napoktól évtizedekig terjedő időskálán működik, stabil, tartós nyomok. A felidézéshez nem kell a hippokampusz, mert különböző agykérgi területeken tárolódik, de a hippokampusz kell az explicit memórianyomok kialakulásához. Magába foglalja az epizodikus, szemantikus, procedurális stb. memóriákat. Példa: Emlékszel egy tíz évvel ezelőtti utazásra, hogy ki írta a Hamletet vagy hogyan kell biciklizni.

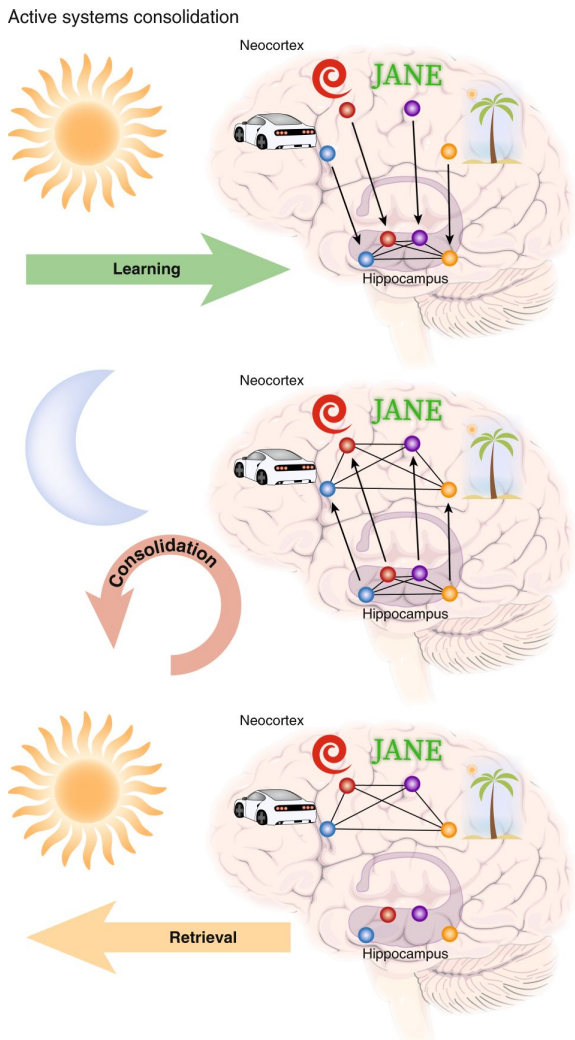
Napközben, a megerősítések hatására, egyre újabb középtávú memóriaelemet gyűjtünk. Az agy számos részén erősödik a serkentő szinapszisok erőssége, melynek eredményeként az agy működése kiegyensúlyozatlanná válhat, közeledik a veszélyes epilepszia felé. Ennek elkerülésére az agyban adenozin szabadul fel, mely csökkenti a szinaptikus átvitel hatékonyságát, tompák, álmosak leszünk. Agyunknak szüksége van egy külső ingertől mentes időszakra, hogy újrarendezze kapcsolatait és felkészüljön új középtávú memória tárolására. Ez az alvás egyik szerepe. Alvás alatt a külvilágból az agykéregbe áramló ingerek feldolgozása javarészt megszűnik, az agynak egy, az ébrenléttől eltérő, máshogy szervezett belső aktivitása indul meg. (korábbi cikkünk az alvásról)



Az alvás-ébrenléti ciklus során (fehér görbe), az adenozin szintje (sárga görbe) változik. Napközben emelkedik, hogy védje agyunkat, alvás alatt pedig visszaesik eredeti szintjére. Magas szintje miatt leszünk estére fáradtak, az adenozin is hozzájárul ahhoz hogy elaludjunk.

Az alvás eltérő fázisaiban a hippokampuszban visszajátszódnak a középtávú memóriában lappangó elemek, újraszerveződnek és a megfelelő agyterületeken beleíródnak a hosszútávú memóriába. A visszajátszások eredményeként az éber tudatot felváltó, módosult tudatállapotban éljük át a napközbeni élményeket, álmokként. Az álmainkra általában azért nem emlékszünk, mert ilyenkor az emlékek feldolgozásáról van szó és nem az álmodás alatt zajló történetek megjegyzéséről. A memóriát vagy olvassuk vagy írjuk 😊.
Az alvás ráadásul nemcsak tárol, hanem átszervez, válogat– így segíti az általánosítást és a kreatív problémamegoldást is.

Az alvás alatt zajló folyamatok tér és időbeli mintázatának vizsgálatából úgy tűnik, az alvás egymást követő szakaszaiban eltérő típusú memórianyomok rögzülése történik meg, más agyterületeken.
Az Explicit (deklaratív) memória: Pl. epizodikus események, tények, tanult szavak elsősorban a lassú hullámú alvásban (SWS) rögzül. A hippokampuszban kezdetben tárolt emlékeket a kéreg felé „átmenti" a rendszer. Példa: egy előző nap megtanult lista másnap pontosabb felidézése jó alvás után.



A memória kialakulásának 3 fázisa. A fontos dolgok a középtávú memóriába kerülnek. Ilyenkor az információ feldolgozó agykérgi területekről áramlik információ a hippokampusz felé, ahol az emléknyomok összeszerelődnek (encoding). Alvás közben a hippokampuszból az agykéreg felé áramlik az összeszerelt információ, hogy annak elemei az egyes területeken rögzüljenek és a közöttük levő kapcsolat megmaradjon. A kialakult memóriák az agykéregben

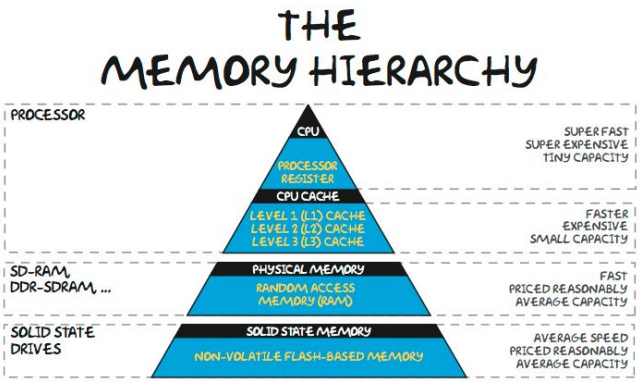
Az Implicit (procedurális) memória: Pl. motoros tanulás (zongorázás, gépírás), perceptuális készségek főként a REM-alvás és a S2 (Stage 2 NREM) alvás alatt rögzülnek (az utóbbiban történik a motoros tanulás korai fázisának rögzülése). A mozgató és érző kérgek kapcsolata erősödik ilyenkor a kisagy és törzsdúc körökkel. Példa: egy új motoros feladat (újfajta fogás, zsonglőrködés) gyakorlása után az alvás segíti a teljesítmény javulását. Ebben az alvási fázisban a homlok és a falilebeny működése gátolt, ezért a tudatos hozzáférés is, hiszen ezek nem kellenek a procedurális memóriában.
Az Emocionális memória: érzelemmel telített emlékek (pozitív vagy negatív) főként a REM-fázisban őrződnek meg, ilyenkor az amigdala és a prefrontális kéreg közti kapcsolat módosul.

A fontos az, hogy az emléknyomok a feldolgozási hierarchia számos pontján több kéregterületen a saját reprezentációs szintjükön rögzülnek párhuzamosan és kapcsolatok alakulnak ki közöttük. Egy tárgy képéből a struktúra és a funkció a magasabb szintű kérgekben tárolódik, az alak, a szín alacsonyabb szinten. Az alacsonyabb szinteken a tanulás kevésbé tudatos, automatikus, a magasabb szinteken tudatos, odafigyelést igényel.

elosztva tárolódnak, innen hívódnak elő, ehhez már nem kell a hippokampusz.

Ezekről lesz majd szó a következő fejezetben.

De előtte még vegyük elő újra a CPU/memória szétválás kapcsán felhánytorgatott számítógépet. Itt is vannak egymásra épülő memória típusok, melyek feladata a CPU felé és felől gyorsabban lapátolni az adatokat. A leglassúbb és legnagyobb kapacitású a RAM, ami megfeleltethető az ember hosszútávú memóriáinak. Vannak aztán különböző szintű cache memóriák, ezeket hívhatjuk akár középtávú memóriának. Magának a CPU-nak is vannak kisméretű, nagyon gyors memóriái, melyek az aktuális feladatmorzsa adatait tartalmazzák, ezt mondhatjuk rövidtávú memóriának, ami egy-egy pillanatot rögzít. És végül vannak még a processzornak műveleti regiszterei, az ezekben található értékeken végez műveletet a CPU, ez kb. megfeleltethető az ember munkamemóriájának. Hasonlóan az emberhez, minél több a regiszter, annál bonyolultabb és gyorsabb műveleteket képes a processzor végrehajtani.



A számítógép memória szintjei. A processzor (CPU) regiszterei az ember munkamemóriájának felelnek meg. A gép az ebben található adatokkal végez műveleteket. Ennek mérete kicsi és csak nagyon rövid ideig vannak benne adatok. A processzorhoz több szintű cache memóriák tartoznak, melyek célja, hogy a számításhoz szükséges adatok gyorsan renelkezésre álljanak. Ezek gyors memóriák és viszonylag nagy kapacitásúak. Az ember rövidtávú és középtávú memóriájának feleltethetők meg. Végül a RAM, SDRAM és SSD memóriákban tárolódnak hosszútávon az adatok, ezek lassabban működnek, de nagy a kapacitásuk és tartósak. Ezek feleltethetők meg az agy hosszútávú memóriájának.

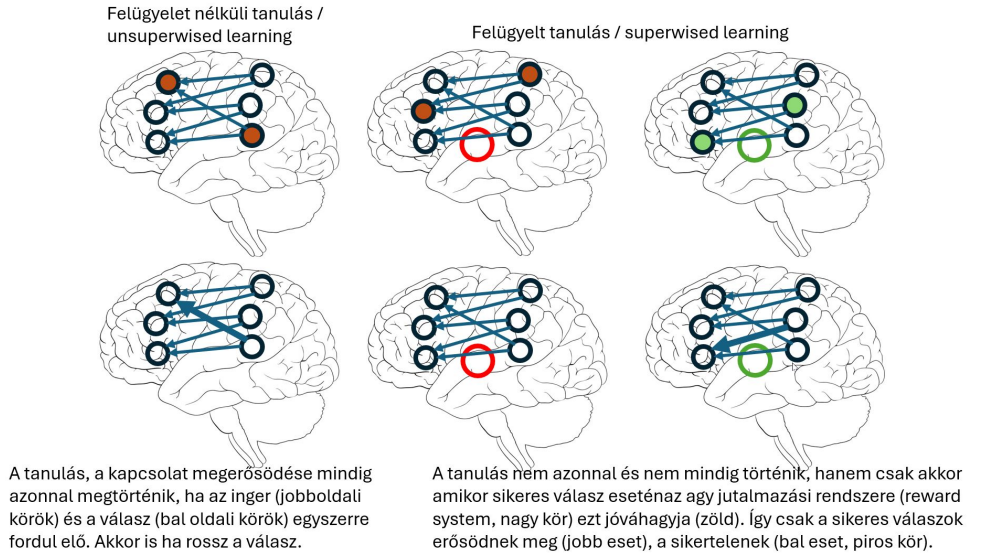
Szerző: **Gulyás Attila**

A tanulás típusai

A tanulás alapja a szinaptikus súlyok megváltozása. A neuronhálózatoknál bemutattuk a memória alapjául szolgáló sejtszintű, társításos (asszociatív) tanulást, mely a Hebb szabályt használva alakítja a szinaptikus súlyokat, és ezért a hálózat információfeldolgozó képességét. Ez ugye a (kis)hálózat szintű tanulást írja le, ami azonnali és mindig bekövekezik, ha megvan az egyidejűség.

Mint a felvezetőben láttuk nem kell azonban mindent megtanulni, hanem csak bizonyos dolgokat, aminek eldöntéséhez és végrehajtásához egy összetett, egész agyat átölelő rendszer kell. Ezenkívül az agyi tanulás egy többlépcsős folyamat: különböző típusú emléknyomok keletkeznek, különböző feldolgozást végző agyi hálózatokban. Az egyszerű, szinte reflexes tanulástól, a kondicionálástól az összetett problémamegoldásig, az agy különböző tanulási módszereket és rendszereket alkalmaz.

Itt most a következő szinten, az agy szintjén járjuk körbe a tanulás típusait és mechanizmusait. Igazodjunk az elme működését vagy az állatok viselkedését vizsgáló pszichológusokhoz, akik számos módon csoportosították a tanulások fajtáit.



A felügyelet nélküli és a felügyelt tanulás különbségei. Ezek agyhálózat szintjén erősen átfednek a nem asszociatív és asszociatív, jutalmazásos tanulással.

Az első megkülönböztetés, hogy vajon a tanulás asszociatív vagy nem-asszociatív, azaz **társításos vagy társítás nélküli**-e.

Kezdjük a társítás-nélküli tanulással. Az egyszerűbb, a legősibb tanulási forma, amelyben nincs kapcsolat két inger vagy inger és válasz között. Azaz nincs megerősítés, működéséhez nem szükséges jutalom vagy büntetés, felügyelet nélkül is működik. A szervezet egyszerűen a környezeti inger ismétlődésének hatására módosítja viselkedését. Ez a típusú tanulás kishálózatokon belül történik, nem szükségesek hozzá a nagy agyi tanuló rendszerek. A társítás nélküli tanulás egyszerű idegrendszerekben is megfigyelhetők (pl. örvényféreg, tengeri csiga, muslica).

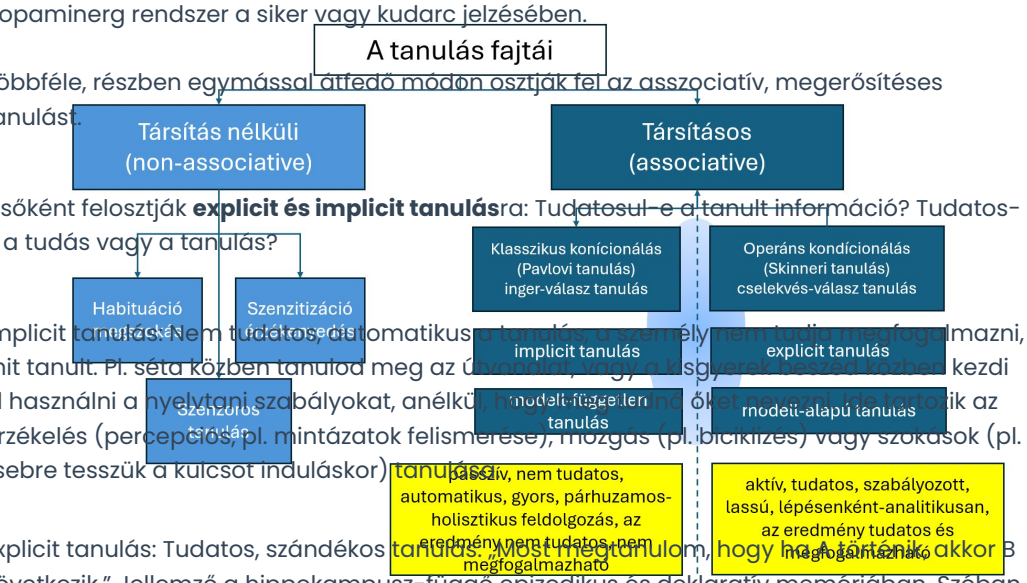
Fő típusai:
-Habituáció (megszokás): az inger ismétlődése csökkenti a válasz erősségét (pl. nem veszed észre a háttérzajt egy idő után). Ez akkor hasznos amikor az inger nem okoz se, jót se rosszat, érdemes figyelmen kívül hagyni, hogy agyunk a lényeges dolgokra tudjon figyelni.
-Szenzitizáció (érzékenyedés): az inger ismétlődése fokozza a válasz erősségét (pl. fájdalmas ingerre nő az érzékenység). Ugye itt egy jó vagy rossz hatású ingerre kezdünk alaposabban odafigyelni.
-A kódolás-reprezentáció kialakulása, a hálózatok betanulása:- Ide tartozik igazából az a tanulás, ami a fejlődő érző kérgekben történik, miközben kialakulnak a sejtek receptív mezői (lásd a Kismacska meséjét), a különböző szintű reprezentációk. Kicsit zavaró lehet, hogy ezt is a társítás nélküli tanuláshoz tesszük, pedig az asszociatív, azaz társításos Hebb szabályt alkalmazza. Azt viszont sejt szinten, nem pedig az agyterületek között (nincs inger-válasz kiértékelés). A kishálózatok sejtjeinek szintjén társítás történik, de egy szinttel feljebb, az agyterületek között nem.

Az asszociatív, társításos tanulás jóval sokszínűbb és többre képes. Itt kapcsolat alakul ki két inger, vagy egy inger és egy válasz között. Az érző agyterületek és a mozgató/tervező agyterületek közötti kapcsolatok módosulnak, a tanulás gyakran jutalomhoz vagy büntetéshez kötött, azaz felügyelt tanulás. Meghatározó a jutalmazásban résztvevő

dopaminerg rendszer a siker vagy kudarc jelzésében.

Többféle, részben egymással átfedő módon osztják fel az asszociatív, megerősítéses tanulást.

Elsőként felosztják **explicit és implicit tanulás**ra: Tudatosul-e a tanult információ? Tudatos-e a tudás vagy a tanulás?



A tanulás fajtái. A társításos tanulást többféleképpen is fel lehet osztani. Lásd a jobboldali három sorát. A bal és a jobb oszlopban található tanulási felosztások jelentős, de nem teljes átfedést mutatnak (erre utal az elmosódott, a tanulásokat magába foglaló ellipszis). A nem átfedő esetekre a példákat lásd a szövegben. A sárga dobozok a két fő kategória tulajdonságait

Implicit tanulás: Nem tudatos, automatikus a tanulás, a személy nem tudja megfogalmazni, mit tanult. Pl. séta közben tanulod meg az úszásnál, vagy a kisgyerek hasonló módon kezdi el használni a nyelvtani szabályokat, anélkül, hogy tudná ezeket nevezni. Ide tartozik az érzékelés (percepciós, pl. mintázatok felismerése), mozgás (pl. biciklizés) vagy szokások (pl. zsebre tesszük a kulcsot induláskor) tanulása.

Explicit tanulás: Tudatos, szándékos tanulás. „Most megtanulom, hogy ha A történik, akkor B következik." Jellemző a hippokampusz-függő epizodikus és deklaratív memóriában. Szóban kifejezhető, kontrollálható. El tudom mesélni mit tanultam.



Az implicit (készség, bal) és explicit (tények, jobb) tanulás máshogy, más rendszerekben történik.

Annak alapján is meg lehet különböztetni eltérő tanulási formákat (**modell független/ modell alapú**) hogy csak ingert társítunk válasszal vagy egy belső modellt használunk és ezzel vetjük össze a kimenetelt.

Modell-független tanulás: olyan tanulás, amely csak a múltbeli jutalmak és hibák alapján alakítja a viselkedést, nincs mentális modell a környezetről. „Ha A, akkor nyereményt kaptam, tehát ismétlem A-t." Szokásalapú, gyors, de kevéssé rugalmas. Elsősorban a törzsdúc rendszerben (striátum) történik ez a típusú tanulás.

Modellen alapuló tanulás: Az agy belső reprezentációt (modellt) épít a környezet struktúrájáról (pl. mi következik miből) és következtet a jövőbeli következményekre. Következményeket mérlegel, előrelátó, célorientált. „Ha ezt csinálom, akkor az fog történni. Próbáljuk meg!" Lassabb, de alkalmazkadó és rugalmas. Elsősorban a homloklebeny és a hippokampusz vesz részt benne.

A mindennapi életben a két tanulási mód együttműködik: az egyik rugalmas és adaptív a másik gyors és energiatakarékos. Gyakran először modellen alapulva, tudatosan tanulunk, aztán egy idő után a helyes megoldások rögzülnek modell-független, automatikus módon. Lásd amikor a munkába járás metróval vagy a gépírás egy idő után készséggé válik. „Lemegy gerincvelőbe", mondják, de igazából pontosabban a striátumba megy le. A tudatos feldolgozás sokkal több agymunkát és ezáltal energiát igényel. Az evolúció takarékos, ha már tudunk valamit, azt agyunk átteszi a modell-független rendszerbe, így gazdaságosabb használni.

A modell-független / modell-alapú és az explicit / implicit tanulás két eltérő dimenzióját írja le a tanulásnak, erős az átfedés köztük, de vannak nem átfedő esetek is.

Azaz a modell-független rendszer legtöbbször implicit, de lehet explicit is (pl. amikor valaki megtanul egy sémát, de nem épít modellt). A modell-alapú rendszer legtöbbször explicit, de lehet implicit is, ha pl. a belső modell nem tudatosul (pl. összetett környezeti megoldások a viselkedésben, de nem tudjuk megfogalmazni miért úgy teszünk, ahogy, bevált).

A lehetőségek:
Modell-független & implicit Reflexes, szokásalapú, gyors Leggyakoribb (pl. szokások, addikciók). A striátum vesz benne részt.
Modell-alapú & explicit Rugalmas, célorientált, tudatos Problémamegoldás, döntéshozás. A homloklebeny és a hippokampusz vesz benne részt.
Modell-alapú & implicit Tapasztalati modellalkotás tudatos verbalizáció nélkül Ritkább, rejtett stratégiai tanulás.
Modell-független & explicit Rituálészerű tanulás, szabály ismétlése modell nélkül Lehetséges, de ritkább.

Hogy a dolog még bonyolultabb legyen csoportosítják úgy is a tanulást, hogy a tanulás egy ingerre adott válasz vagy egy akcióra adott válasz után következik-e be?

Stimulus-outcome és az action-outcome tanulás:

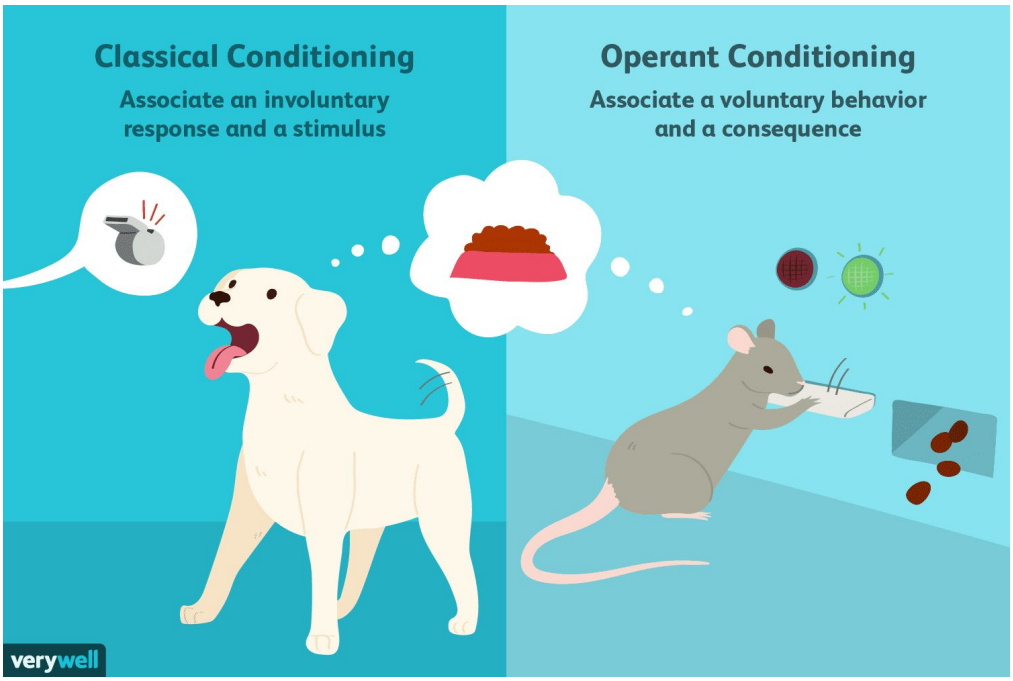
Stimulus–Outcome (inger - válasz) tanulás: Gyakran passzív, nincs szükség döntésre vagy cselekvésre. A tanulás automatikusan bekövetkezik az inger és a jutalom társításával. A szervezet nem számolja ki, „mi lenne, ha" – egyszerűen megtanulja, hogy az adott ingerhez kellemes vagy kellemetlen következmény tartozik. Ez hasonlít a modell-független/ implicit tanulásra, ahol értékalapú tanulás történik, nem szabályszerűségek alapján. Ez felel meg leginkább a klasszikus kondícionálásnak, Pavlovi tanulás, hiszen itt is egy ingert társítanak egy válaszhoz.



A tanulás mechanizmusainak két kutatója, Pavlov és Skinner. A klasszikus és az operáns kondícionálás tanulási modellek kidolgozói.

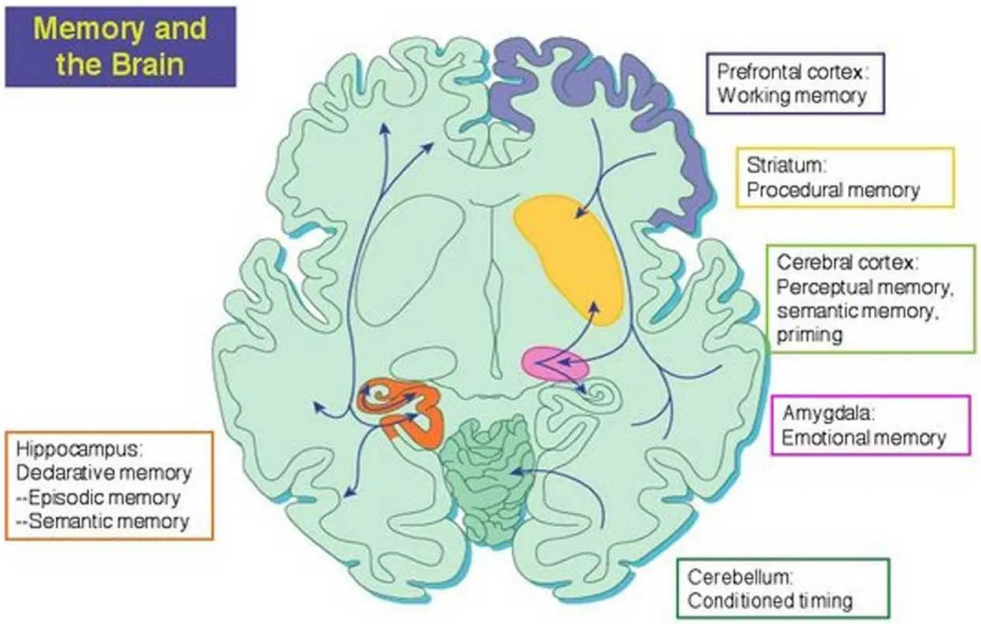
Action–Outcome (cselekvés - válasz) tanulás: A szervezet megtanulja, mely cselekvés vezet egy adott kimenetelhez. Ehhez gyakran szükség van arra, hogy a szervezet elképzelje: „ha most ezt csinálom, akkor X fog történni". Ez már mentális modell használatát igényli, és ezért közel áll a modell-alapú/explicit tanuláshoz. Ilyenkor a jövőbeli következményeket mérlegelve történik a választás. Ez az operáns kondícionálás (Skinneri vagy instrumentális tanulás) kezdeti szakaszával egyezik meg, hiszen itt egy tev, egy cselekedet erősödik meg, ha jutalmat kapott rá az állat. A tanulás végére, amikor aztán már sokat gyakorolta és automatikussá válik, akkor már igazából inger-válasz reakcióvá válik.

Az utóbbi felosztás részben megfeleltethető a korábbiaknak, de nem teljesen, mert létezik 4 kombináció. A Stimulus–Outcome tanulás megjelenhet modell-alapú/explicit rendszerben is, ha az inger a mentális modell része (pl. kontextus vagy helyzet mint input). Ugyanakkor az Action–Outcome tanulás lehet modell-független is, ha a szervezet csak szokásalapúan választ, anélkül, hogy újraértékelné az összefüggéseket (pl. „eddig ez működött, most is ezt csinálom").



A kétfajta tanulás eltérő dolgokat társít. A Pavlovi, egy ingert társít egy cselekedethez, a Skinneri egy viselkedést rögzít jutalmazással.

Ami fontos, hogy a 4 kombináció más agyi rendszereket használ:
modell-független: Dorzolaterális striátum, dopaminerg projekciók. Automatizált értéktanulás, Klasszikus: szokások, motoros készségek, (ritka, de lehet pl. szabály memorizálása).
modell-alapú: Dorzomediális striátum, prefrontális kéreg (PFC), orbitofrontális kéreg, hippokampusz. Tervezés, következmények értékelése.
inger–válasz tanulás: Amigdala, orbitofrontális kéreg, ventrális striátum. Asszociáció tanulás
cselekvés–válasz tanulás: Dorzomediális striátum, prefrontális kéreg (PFC). Döntésorientált tanulás



A különböző tanulásokban résztvevő agyi rendszerek.

A tanulási típusokat összevethetjük a fentebb tárgyalt memória típusokkal is. Az implicit/ modell-független/inger-választ tanulás leginkább a procedurális memóriába kerül, míg az

explicit/modell-alapú/akció-válasz leginkább a szemantikus memóriába.

A tanulási módok után folytassuk a jutalmazási rendszer leírásával.

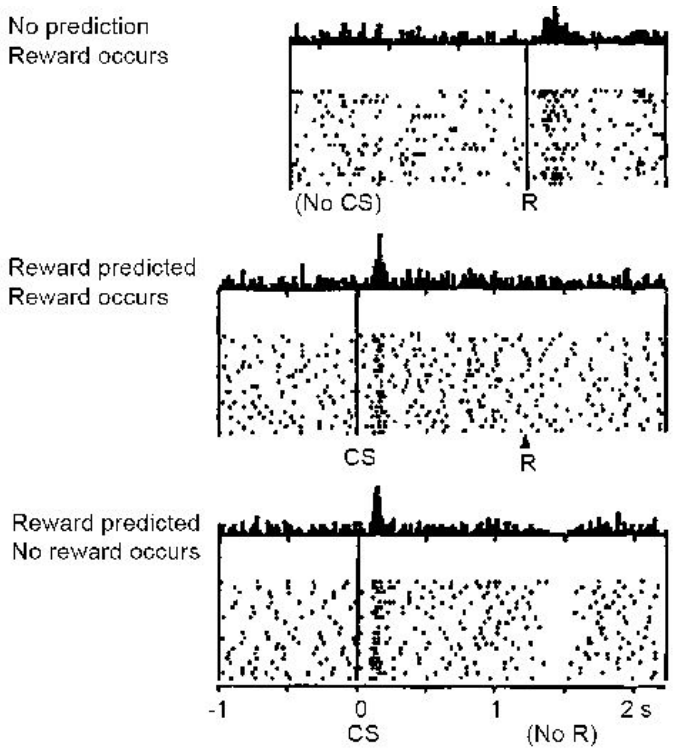
Szerző: **Gulyás Attila**

A jutalmazási rendszer:

Most hogy átvettük a memóriák és a tanulás fajtáit, jön a legcikornyásabb rész, a jutalmazási rendszer (reward system) felépítésének és működésének bemutatása. A jutalmazási rendszer az agy egyik legfontosabb motivációs és tanulási rendszere, amely lehetővé teszi, hogy egy szervezet súlyozza (priorizálja), megtanulja és előnyben részesítse azokat a viselkedéseket, amelyek kellemes vagy hasznos kimenetelhez vezetnek és elkerülje azokat amik nem. A különböző típusú tanulások másként használják ezt a rendszert.

A jutalmazási rendszer állapítja meg mikor és hol kell tanulni. Ez a visszacsatolás teszi lehetővé hogy ingerekre egyre jobb válaszokat adjunk vagy egyre hatékonyabb terveket kovácsoljunk, annak alapján, hogy a jobb-sikeresebb válaszhoz vezető cselekedetek rögzülnek.

A jutalmazás megértéséhez be kell vezetni egy fogalmat, a reward prediction errort (RPE), a jutalom jóslás hibáját. Ez egy érték, az elvárt és a bekövetkezett jutalom közötti különbség. RPE=bekövetkezett jutalom értéke – az elvárt jutalom értéke. Ahhoz hogy jobban válaszoljunk nem azt kell megnéznünk, hogy a kimenetel jó-e, hanem hogy jobb-e, mint korábban. Ha ugyanolyan jó akkor nem kell tanulni, hiszen már tudjuk a választ. Ezért kell a jelenlegi kimenetel és a korábbi kimenetel jóságának különbségét venni. Ha az érték pozitív, azaz a bekövetkezett jutalom nagyobb mint az elvárt, az jó, érdemes tanulni. Ha negatív, azaz a bekövetkezett jutalom kisebb mint a várt, az nem jó, ilyenkor nem szabad tanulni (jobb törölni a balsikerű megoldást), mert nem akarunk roszabbat mint volt. Ha nulla, azaz azt kaptuk amit elvártunk, akkor nem kell tanulni, hiszen már tudjuk a tutit.

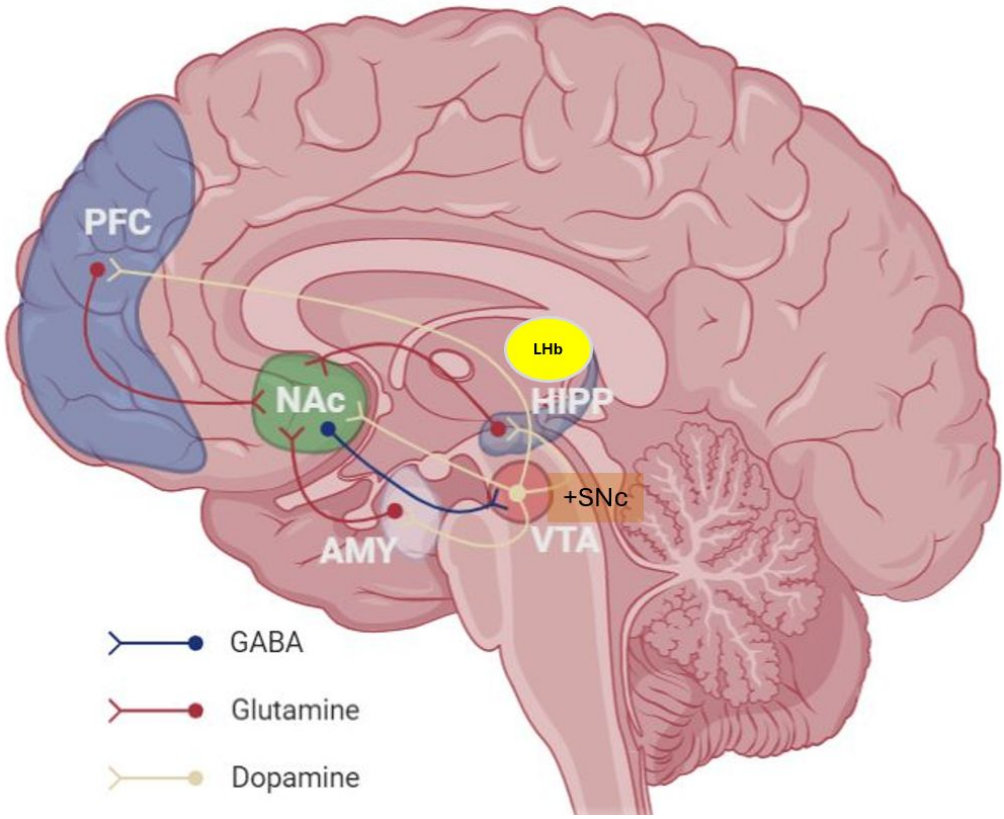


A Jutalom Jóslás Hibáját (Reward Prediction Error, RPE) jelző dopamin sejt aktivitása a ventrális tegmentális területen (VTA). Felül egy váratlan jutalom érkezik (R), ezért a sejt aktív lesz és utasítja az agyat, hogy jegyezze meg ami történt, mert jutalomra vezet. Középen egy ismert ingerre (CS) gyengén reagál a sejt,

amikor a jutalom (R) megérkezik, mert már számított a jutalmazási rendszer a jutalomra. Jól válaszoltunk, nem kell tanulni. Alul a korábbi ígéretes ingerre (CS) gyenge a válasz. Mivel nem érkezett jutalom (NoR), a dopamin sejt tüzelésének felfüggesztésével jelzi a negatív RPE-t, azaz hogy felejtsük el amit tanultunk, mert csalódást okozott. Dopamin ugye kétszer szabadul fel, először az ingerrel kapcsolatban jelzi mire számíthatunk, majd a jutalommal kapcsolatban jelzi, mennyivel több mint amire számítottunk.

Az RPE kiértékelésében a VTA és kisebb mértékben a substantia nigra pars compacta része (SNc) vesz rész (részletesebben hamarosan). Ha jól cselekedtünk ezen területek dopaminerg sejtjei dopamint öntenek a megfelelő agyterületekre. Pozitív RPE sok dopamin, nulla RPE kis mennyiségű dopamin, negatív RPE semennyi dopamin felszabadulásával sem jár.

A második lépés, hogy dopamin hatására egyrészt bekövetkezik a tanulás a megfelelő területeken (erről is hamarosan). Másrészt a felszabaduló dopamin örömet és a siker élményét okozza, illetve motivációt vált ki a megfelelő agyterületeken keresztül a cselekvés irányába (természetesen ezt is kifejtem).
Nézzünk itt egy listát a jutalmazási rendszerben résztvevő agyterületkről, majd merüljünk el a részletekben



A jutalmazási rendszer elemeinek elhelyezkedése az agyban. A részletek a szövegben.

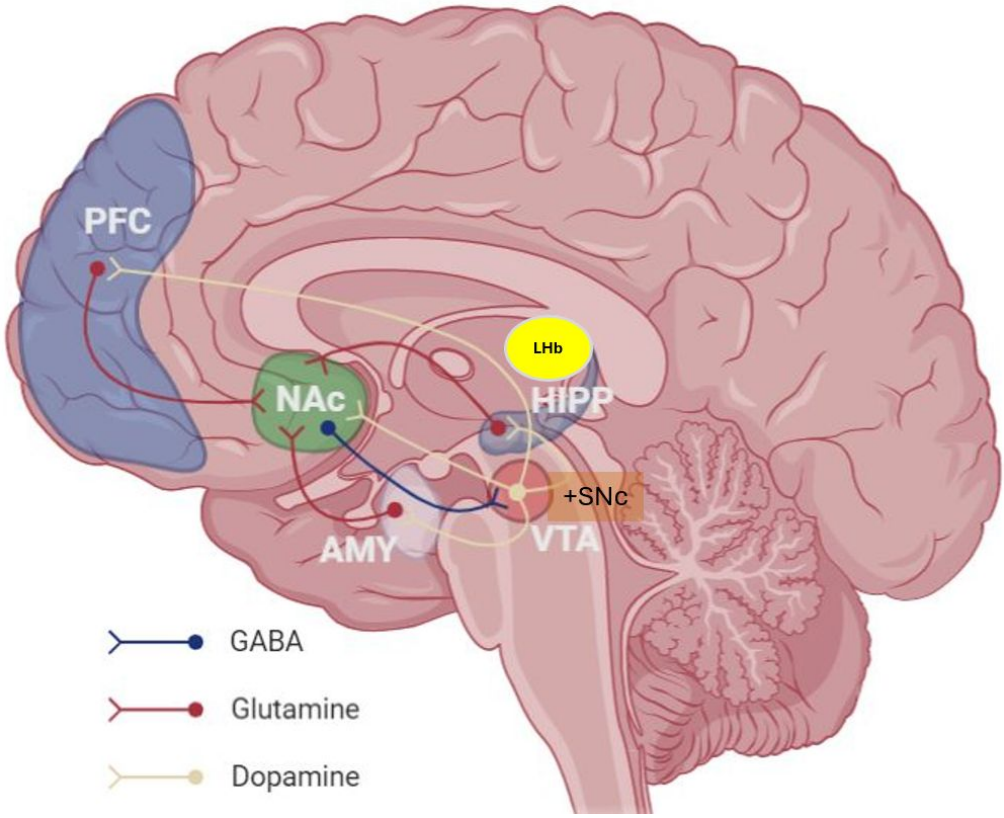
Ventralis tegmentalis area (VTA): Dopamint termel, kulcsszereplő a jutalomjelzésben
Substantia nigra pars compacta (SNc): Főként a motoros tanulással kapcsolatos dopaminjelet biztosítja.
Nucleus accumbens (NAc, ventrális striatum): Siker esetén fontos a megerősítésben, illetve a jutalom előrejelzésében és ezáltal a motivációban.
Laterális habenula (LHb): negatív ingerek esetében aktiválódik és közvetíti ezek hatását a

VTA felé.
Prefrontális kéreg (vmPFC, OFC): kiszámolja a várt jutalom értékét, részt vesz a döntéshozásban, illetve a modell-alapú, explicit tanulásban és memóriában.
Amigdala (AMY): Az ingerekhez érzelmeket rendel, illetve megtanulja legközelebb egy ingerhez milyen érzelmet rendeljen.
Hippokampusz (HIPP): Kontextust és epizodikus emlékeket társít a jutalomhoz.

Szerző: **Gulyás Attila**

A jutalmazási folyamat első lépése, az RPE kiszámítása

A dopaminfelszabadulás –a jutalom-predikciós hiba (RPE, reward prediction error) kódolása összetett agyi rendszerek összehangolt működése nyomán jön létre. Ezek a rendszerek érzékelik, összevetik és értékelik a várt és a bekövetkezett kimeneteleket, és ennek alapján határozzák meg, hogy felszabadul-e dopamin, milyen mennyiségben, és mely agyterületeken. Ami fontos, hogy nem a jutalom értéke számít itt, hanem a jutalom változása és váratlansága. Ez tanít minket a legjobban, hibáinkból és sikereinkből tanulunk a legjobban, nem a kb. jó rutinszerűen megcsinált dolgokból.



A jutalmazási rendszer elemeinek elhelyezkedése az agyban. A részletek a szövegben.

A következő területek vesznek részt ebben a folyamatban:
1. Prefrontális kéreg (vmPFC, OFC) – Elvárások kiszámítása
A ventromediális prefrontális kéreg és az orbitofrontális kéreg (OFC) a korábban tanultak alapján kiszámítja a várható jutalom értékét („ezt várom”), és ezt a jóslást eljuttatja a dopamin sejtek felé (elsősorban közvetve).
2. Pedunculopontine tegmentális mag (PPTg) és a laterális hypotalamusz – Valós kimenetel érzékelése
Ezek a területek az érzékszervek felől érkező tényleges jutalom, „ezt kaptam” értékét juttatják

el a dopamin sejteknek, melyek ezt összevetik az előző értékkel.

3. Laterális habenula (LHb) – Negatív kimenetelek jelzése

A laterális habenula (LHb) kulcsszereplő a negatív predikciós hiba feldolgozásában. Ha büntetést kapunk vagy egy várt jutalom elmarad, az LHb aktiválódik és gátló hatást fejt ki a ventrális tegmentális terület (VTA) dopaminerg sejtjeire. Az LHb tehát gátolja a dopamin-felszabadulást negatív tapasztalatok esetén, ezzel értesíti a tanulást a „nem érdemes" viselkedésekről. Megalapozza az elkerülő viselkedések tanulását. Fontos a NoGo típusú válaszok erősítésében, például amikor „ne nyúlj a tűzhöz" típusú szabályok tanulása történik. De az LHb modulálja a szerotonerg rendszert is, serkenti a median raphe és dorsal raphe aktivitását és ezáltal növeli a szerotoninszintet, különösen elkerülendő (averzív) vagy frusztráló helyzetekben. A szerotonin így szerepet kap a viselkedés gátlásában, kockázatkerülésben és a negatív megerősítés hosszabb távú tanulásában. Végül az LHb, a laterális hypotalamusz és a középagy befolyásolásával hangolja az autonóm (ösztönös testi reakciók, izzadás, szívritmus) és motivációs válaszokat is. Az LHb ingerlése elkerülő viselkedést vált ki és dopaminszint-csökkenést okoz. Krónikus LHb túlműködés állatmodellekben depresszióhoz hasonló viselkedést eredményez (anhedonia, motivációhiány).

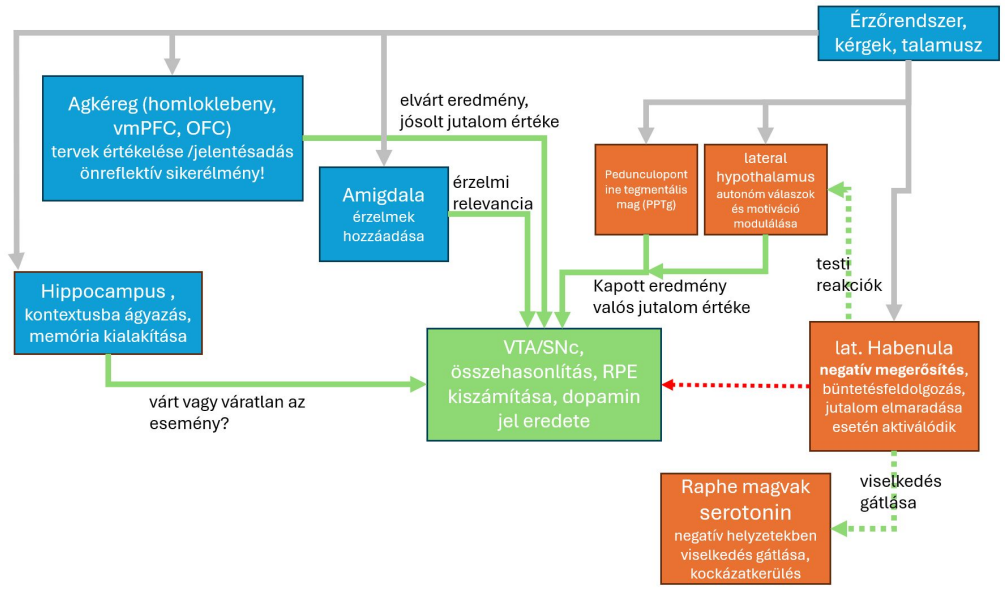
4. Hippokampusz – Kimenetel kontextusának értékelése

A hippokampusz téri és epizodikus információt szolgáltat arról, milyen környezetben (kontextusban) történt egy válasz vagy esemény. Ez információval látja el a VTA-t, segít eldönteni, hogy egy esemény várt vagy váratlan volt-e. A hippokampusz tehát nem közvetlenül dönti el, hogy kell-e dopamin, de kontextualizálja a válasz sikerességét.

5. Amigdala – Érzelmi értékelés és jutalom fontosság

A bazolaterális amigdala (BLA) értékeli, hogy egy inger vagy kimenetel mennyire releváns érzelmileg. Az érzelmileg hangsúlyos események (pl. erős pozitív vagy negatív jelentésűek) nagyobb súlyt kapnak, megnő vagy gátlódik a dopamin-felszabadulása.

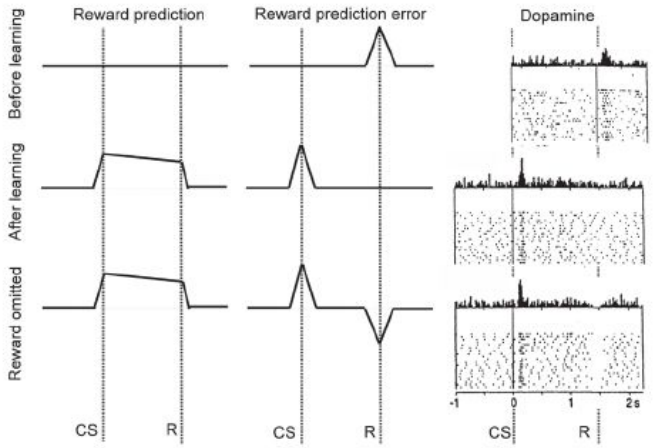
Mindezeket összevetve alakul ki a jóslási (predikciós) hiba, azaz, hogy mennyi dopamin szabaduljon fel.



Az RPE kiszámítása a VTAban: Az érzékelő és tervező rendszer jeleket szállít számos agyterület felé (szürke nyilak). Ezek alapján a prefrontális kéreg (homloklebeny) kiszámítja a várható jutalmat, a PPTg és a laterális hypothalamus pedig a valós jutalmat. Az amigdala és a hippokampusz érzelmi töltést és kontextust ad a számításhoz. A laterális habenula (LHab) negatív esetekben aktiválódik. Az információk eljutnak a VTA dopamin sejtjeire (zöld nyilak). A LHab gátlást fejt ki a VTA-ra, de jeleket küld a raphe magvakba és a hipotalamuszba is (szaggatott nyilak). Ezen jelek összegzése váltja ki a VTA a dopamin sejtek megfelelő mértékű tüzelését.

Összegezve: hogyan születik meg a dopaminfelszabadulás?

- Predikció kialakul (OFC, vmPFC, amigdala, hippokampusz)
- Tényleges kimenetel észlelése (szenzoros rendszerek, talamusz)
- Predikciós hiba kiszámítása (összehasonlítás: PFC ↔ LHb ↔ VTA)
- Dopaminerg sejtek válasza (VTA, subsztancia nigra kompakt része (SNc))



Dopaminfelszabadulás +, 0 és - RPE hatására. A dopaminsejtek alapállapota, hogy kicsit aktívak. Ez lehetővé teszi, hogy felfelé és lefelé is módosulhasson a felszabaduló dopamin mennyisége. A három sor a 3 lehetséges RPE forgatókönyvet mutatja. A bal oszlop a jutalom jóslás értékét, a középső, a hibát, azaz a kapott mínusz elvárt értéket mutatja (ennek felel meg a dopamin sejtek működése, a dopaminfelszabadulás mértéke). A jobb oszlop pedig a dopaminsejtek aktivitását mutatja a 3 esetben. Egymás alatt a sejtek kisülése van felpöttyözve 10-15 kísérletből, felül pedig a kisülések összege. Látni, hogy két alkalommal szabadulhat fel dopamin. Először az inger megérkezésekor, jelezve annak korábban megtanult értékét, másodszor az akcióra kapott jutalom bekövetkeztekor. Tanulás előtt (első sor), ugye még hiányik az első felszabadulás, mert nem tudjuk mire számítsunk. A második csúcs jelen van, mert váratlan jutalom érkezett. A felszabaduló dopamin jelzi az agynak, hogy tanulja meg ami kicsit korábban történt, bármi is az, mert jóra vezetett. Sikeres megerősítéskor (második sor) a második csúcs elmarad, hiszen már nem kell tanulni, mert tudjuk a választ. Amikor a jutalom elmarad (harmadik sor) az első felszabadulás a jóslát jelenti, de itt elmarad a jutalom és így a második alkalommal negatív lesz az RPE, kikapcsolnak a dopamin sejtek. Ez jelzi majd, hogy felejtsük el ezt a választ, mert nem jó.

A dopaminerg sejtek kisülési gyakorisága a bemeneti aktivitás függvényében változik. Pozitív RPE (jutalom vártnál nagyobb vagy váratlan): serkenti a VTA dopaminsejteket, mely fokozott dopaminfelszabadulást vált ki. Ennek következményei tanulás, megerősítés, szinapszisok megerősödése a megfelelő, az adott típusú tanulásban résztvevő agyterületeken. Negatív RPE (jutalom elmaradása vagy kisebb a vártnál): LHb aktiválódik és gátló neuronokon keresztül gátolja a VTA-t. Ennek eredményeként a dopaminfelszabadulás csökken vagy teljesen elmarad, melynek viselkedési következménye a tanulás a hibából, kioltás. Semleges RPE (várt = kapott jutalom): dopaminaktivitás nem változik jelentősen, ilyenkor nincs megerősítés.

Szerző: **Gulyás Attila**

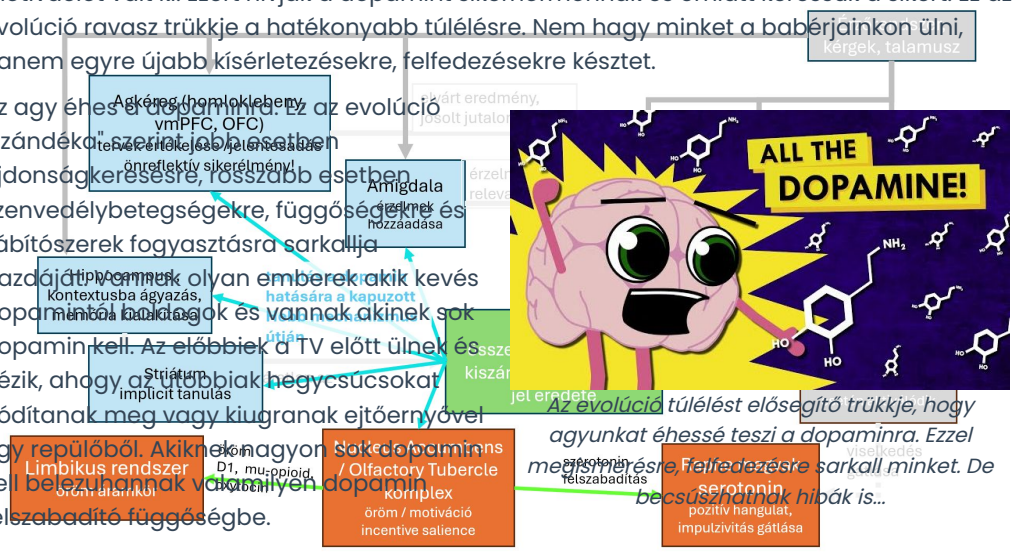
A jutalmazás folyamat második lépése, a dopaminfelszabadulás többszörös hatása

Eljutottunk végre oda, hogy kiértékeltük a válasz sikerét és kaptunk egy pozitív, egy nulla vagy egy negatív reward prediction error-t (RPE). Ennek megfelelően sok dopamin szabadul fel, kevés dopamin szabadul fel vagy nem szabadul fel dopamin. Ez lesz a jel arra, hogy kell-e tanulni, a szinaptikus kapcsolatok megerősödjenek, ne változzanak vagy gyengüljenek.

A dopaminnak nem csak a tanulásra van hatása. Arról is tájékoztatja az agyat, hogy tessék örülni, jó amit csináltunk. Bizonyos agyi rendszerek bekapcsolásával örömöt, sikerélményt és

motivációt vált ki. Ezért hívják a dopamint sikerhormonnak és emiatt keressük a sikert. Ez az evolúció ravasz trükkje a hatékonyabb túlélésre. Nem hagy minket a babérjainkon ülni, hanem egyre újabb kísérletezésekre, felfedezésekre késztet.

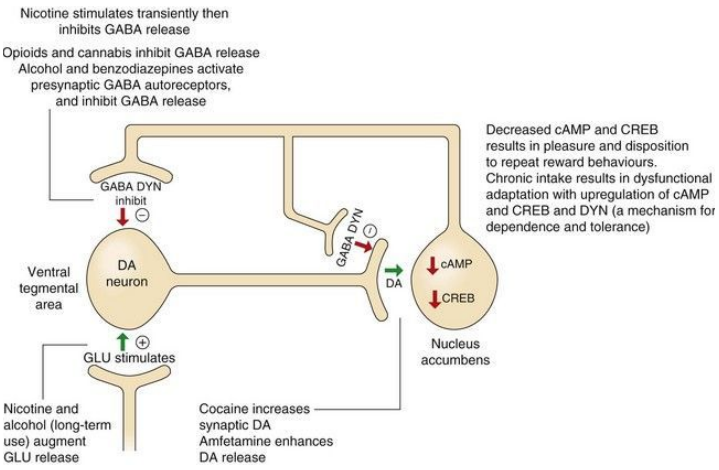
Az agy éhes a dopaminra. Ez az evolúció "szándéka" szerint jobb esetben újdonságkeresésre, rosszabb esetben szenvedélybetegségekre, függőségekre és kábítószerek fogyasztásra sarkallja gazdáját. Annak olyan emberek akik kevés dopamintól boldogok és vannak akinek sok dopamin kell. Az előbbiek a TV előtt ülnek és nézik, ahogy az utóbbiak hegycsúcsokat hódítanak meg vagy kiugranak ejtőernyővel egy repülőből. Akiknek nagyon sok dopamin kell belezuhannak valamilyen dopamin felszabadító függőségbe.



Az evolúció túlélést elősegítő trükkje, hogy agyunkat éhessé teszi a dopaminra. Ezzel mesterségesre, felfedezésre sarkall minket. De becsúszhatnak hibák is...

A jutalmazási folyamat második fázisa, a dopamin kettős hatása. Az első hatás, hogy a világoskék nyilakkal jelzett pályákon keresztül dopamin szabadul fel különböző kérgi területeken, hogy ott tanulást váltson ki. A másik hatás, hogy a ventrális tegmentális area (VTA) aktiválja a nucleus accumbenst, ahol a világoskék nyilakkal jelzett útvonalakon örömöt és sikerélményt, jóleséseket vált ki. Részletek a szövegben.

Gyakorlatilag az összes kábítószer közvetve vagy közvetlenül belekontárkodik a dopamin rendszerbe. Sokuk direktben a dopamin hatását utánozza, azzal hogy a dopamin receptoraihoz kötődik vagy dopaminfelszabadulást vált ki (amfetamin, MDMA, kokain), míg mások valami kerülőúton hatnak. Dopaminfelszabaduláshoz vezetnek (heroin, morfin, fentanyl, THC, nikotin, alkohol, kisebb mértékben LSD). Ennek összetett következményei vannak. Egyrészt a dopamin majd alant ismertetett hatásai miatt sikert, örömet érzünk, másrészt amit éppen csináltunk azt a dopaminfelszabadulás miatt „remek" dolognak tartja agyunk és megtanulja. Rögzül benne a cselekedet. Ennek az a rettenetes következménye van, hogy amikor a droghasználó már kellemetlennek, rettenetesnek találja a drog hatását, még akkor is arra sarkallja agya, hogy csinálja azt a cselekvéssorozatot ami a drog beszedéséhez vezet. Hiába vonul be valaki elvonókúrára és lesz „tiszta", élete hátralevő részében epekedni fog a drog után, mert agya arra kényszeríti.



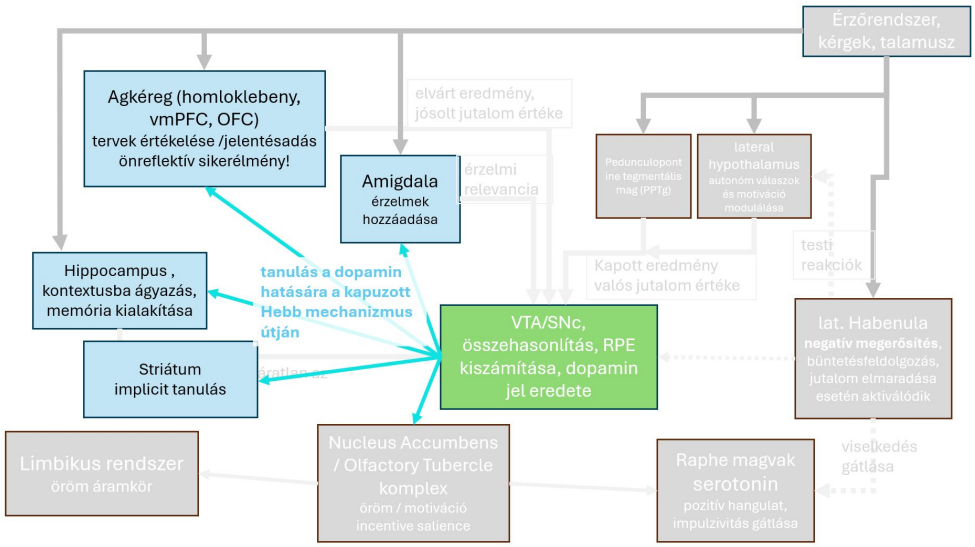
A kábítószerek számos helyen hatva képesek növelni a dopamin felszabadulást. Serkenthetik a VTA sejtjeit, vagy csökkenthetik a rájuk érkező gátlást. Mivel a dopamin rendszer droghasználatkor aktiválódik, az agy megtanulja, hogy ez jó dolog és a jövőben is csinálni akarja.

A következőkben részletesen is megnézzük az összetett hatás elemeit, hogyan tanulunk és miért örülünk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Hogyan és hol vált ki a dopamin tanulást?

Annak a bemutatásával folytatjuk hogyan szabályozza a dopamin a tanulást?



A dopamin a striátumban és különböző kérgi területeken felszabadulva engedélyezi a tanulást (világoskék nyilak).

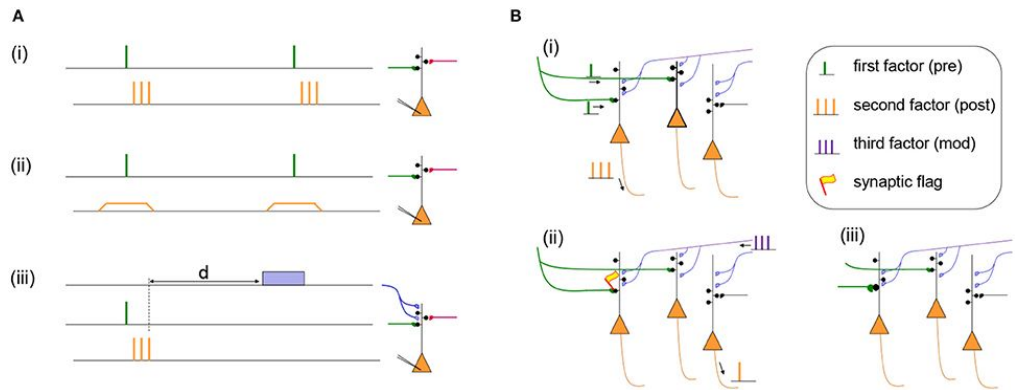
Van itt azonban néhány bökkenő. Korábban azt tanultuk, hogy ha két sejt egyidejűleg aktív, akkor a közöttük lévő szinapszis megerősödik. Viszont a felügyelt tanulásban a jel a sikerről csak később érkezik.

Vegyük végig mi is történik amikor egy ingerre vagy egy problémára válaszolunk:

1) inger érkezik vagy megoldandó feladat merül fel
2) az érzékelő ágon az agykérgi hierarchia ezt feldolgozza, vagy a homloklebeny értelmezi a feladatot
3) ezután jönnek a tervezés hurkai (lásd feljebb), melynek során a kéreg-törzsdúcok/ kisagy-talamusz körökben kiválasztásra kerül a legjobb megoldás (ugye már itt is felszabadul dopamin)
4) a megoldást a motoros rendszer végrehajtja
5) erre történik valami a környezetben, megkapjuk vagy nem kapjuk meg a büntetést vagy a jutalmat
6) agyunk a jutalmazási rendszer segítségével kiértékeli a dolgokat és az RPE-nek megfelelő mennyiségű dopamin (második alkalommal szabadul fel) tájékoztatja az agyat arról, hogy most tanuljon vagy ne, boldog legyen vagy ne.

Az első bökkenő az, hogy a jel arra hogy tanulni kell, jóval később (akár másodpercek) érkezik, mint amikor a válasz kidolgozásakor a tervezés hurkaiban az idegsejtek működnek és a Hebbi társítás kialakulására alkalmas idegsejt együtt aktiválódások bekövetkeznek. Pedig ugye ezeknek a kapcsolatoknak kellene megtanulniuk mi a helyes válasz. Azaz a Hebbi társításhoz már nincs meg a tervezőrendszerben az idegsejtek közötti aktivitás egybeesése, amikor a tanulási jel megérkezik. Ha a szinapszisok módosítása a megoldás kidolgozásakor történik, az eredménytől függetlenül, mindent megtanulunk, a rossz megoldást is, ez nem jó.

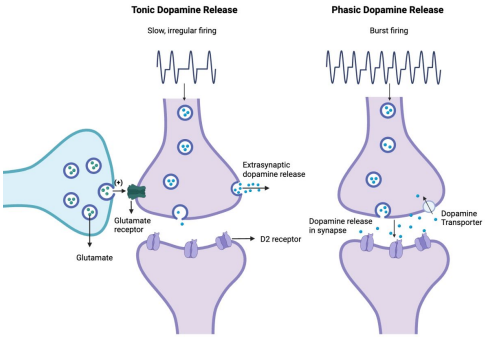
Azaz az evolúciónak meg kellett oldania azt, hogy ne akkor történjen a szinapszisok módosulása, amikor a sejtek együtt tüzelnek, hanem amikor a dopamin megérkezik. De megoldotta ezt is. Kicsit hekkelte a szinapszisok megerősödéséhez vezető molekuláris hatásláncon. Előállt a „synaptic eligibility trace", a szinaptikus „jogosultsági nyom" címke bevezetésével. Amikor a feladat kidolgozása során megszületik az eredmény, a Hebb



A dopamin által kapuzott Hebb szabály működése, mely lehetővé teszi a késleltetett, felügyelt tanulást: A) A preszinaptikus axon aktivációja kombinálva a posztszinaptikus sejt tüzelésével (i) vagy annak depolarizációjával (ii) a klasszikus esetben elég az LTP beindulásához, a szinaptikus súly megnövekedéséhez. A kapuzott tanulásnál azonban csak akkor történik súlymódosulás, ha a bemeneti és a sejtaktivitás egybeesését meghatározott időn belül dopaminfelszabadulás követi (iii). B) A kapuzott tanuls lépései: (i) A zöld pályán érkező akciós potenciálok a bal oldali sejtben egybeesnek a sejt tüzelésével. Ennek a sejtnek erre a szinapszisára egy címke kerül (kis zászló a ii. ábrán). A középső sejt ugyen kap bemenetet, de nem aktív, a jobboldali még bemenetet sem kap, ezért egyikük szinapszisai sem kapnak címkét. Amikor a jutamazási rendszer döntése alapján dopamin szabadul fel a kék axonokból (iii) a sejt megjelőlt szinapszisának erősség emegnő (nagyobb fekete kör).

szabálynak eleget tevő szinapszisok kapnak egy molekuláris címkét, mely néhány másodperig érvényes, de a súly megerősödése még nem történik meg. Amikor beérkezik a kiértékelés eredménye -a pozitív RPE miatt felszabaduló nagy mennyiségű dopamin- akkor a megcímkézett szinapszisokban megindulnak a korábban vázolt molekuláris folyamatok, melynek eredményeképpen több AMPA receptor épül be a szinapszisokba (LTP), és annak súlya megnő. Ezt hívják „gated Hebbian mechanism"-nak, azaz kapuzott Hebbi tanulásnak. Ha az RPE nulla, egy kevéske dopamin szabadul fel, akkor a címkézett szinapszissal nem történik semmi. Ha viszont az RPE negatív, rossz lóra tettünk, akkor a szinapszisok gyengülnek (LTD). Ezeknek a molekuláris részleteibe nem mennék bele, mert nem kell a megértéshez. Egy érthetőbb példa: Képzeljük el, hogy a szinapszis olyan, mint egy ajtó, amely csak akkor nyílik ki (változik meg), ha előbb kopogtál rajta (aktiválódott), és aztán érkezik egy jelszó (dopamin). A kopogás után az ajtó pár másodpercig „figyel", várja a jelszót. Ha megkapja, kinyílik (megerősödik a kapcsolat). Ha nem, bezárul.

A másik bökkenő az, hogy a folyamatban kétszer is van dopamin felszabadulás (3. és 6. lépés). Mint azt a tervezés hurkai részben írtuk, először a helyes megoldás kiválasztásánál szabadul fel dopamin. Ezután ismét felszabadul dopamin (vagy nem), amikor a válasz kiértékelése megérkezik, fél-egy másodperccel később. Az első esetben nem történik tanulás, a dopamin a helyesnek vélt megoldást serketi vagy gátolja, a Go vagy NoGo pálya kapuzásával. A második esetben a dopamin a helyes vagy helytelen Go vagy NoGo kapcsolatokat erősíti vagy gyengíti. Az evolúció megoldotta, hogy az agy és a szinapszisok tudják, az első vagy a második felszabadulásról van szó, és ennek megfelelően reagáljanak.
Akció kiválasztása előtt / közben: a dopamin elősegíti mit válasszunk. Ilyenkor, elsősorban az SNc ből származó dopamin lassan, egyenletesen szabadul fel (tónikus dopaminszint), vagy korábbról maradt a szinapszisok közelében. A törzsdúcok direkt és indirekt pályái (D1- és D2-receptoros sejtek) a dopamin jelenlétében könnyebben engedik át vagy erősebben vétózzák a kérgi terveket. Ez a „kapuzó" hatás. Ha megfelelő a dopaminszint, a striatum elősegíti a kiválasztott viselkedést. Ez nem tanulás, hanem állapotmoduláció – pl. motivált vagy, energikus vagy, nagyobb eséllyel hajtasz végre akciót.
Az akció következményének értékelése után (RPE= jutalom, hiba, váratlanság), a VTA dopaminsejtjei tüzelnek, de nem egyenletesen, hanem burst-ökben, gyors kisüléssorozatokban (fázisos, szakaszos dopaminszint) és ilyen mintázatban szabadítanak



A dopamin két felszabadulási módja a tervezés és a kiértékelés fázisaiban. A tervezés alatt a dopamin sejtek lassan tüzelnek (bal), melynek hatására a dopamint tartalmazó szinaptikus hólyagocskák nem a szinaptikus résbe, hanem az axonvégződések oldalán szabadulnak fel. Ennek hatása, hogy a dopamin lassan és sokáig hat. Itt a rendszerben van még egy csavar. A dopamin terminálisok közelében lévő serkentő végződésekből felszabaduló glutamát hangolni tudja, hogy mennyi dopamin szabaduljon fel. A megerősítés fázisában, pozitív RPE esetén a dopamin sejtek gyors kisüléssorozatokban aktívak (jobb), melynek hatására a dopamin a szinaptikus résbe ürül, erős, rövid ideig tartó és ezért pontosan időzített hatást fejtve ki.

fel dopamint. A tüzeléssorozat erőssége a predikciós hiba nagyságától függően változik. Ez a fázisos aktivitás megérkezik a striatumba (és az agykéregbe), ahol módosítja a szinaptikus hatékonyságot, azáltal, hogy a tervezés során címkézett (tagelt) szinapszisokban jutalom esetén megerősíti az adott kéreg–striátum (kéreg-kéreg) kapcsolatokat, ellenkező esetben gyengíti. Ez a „tanuló” hatás, mely nem az akció végrehajtását segíti, hanem a jövőbeli döntések tanulását.

Szerző: **Gulyás Attila**

Hogyan vált ki a dopaminfelszabadulás örömet és sikerélményt

Nézzük akkor a dopamin második hatását. Ugyanis a pozitív RPE (sok dopamin)– vagyis amikor a kapott jutalom nagyobb vagy váratlanabb, mint amit előre vártunk – nemcsak tanulási jelet, hanem szubjektív élményt is kivált: örömöt, elégedettséget, "sikerérzést".

Ez egy fontos visszajelzés agyunknak, mert ezzel felderítésre, próbálkozásra, kíváncsiságra serkent minket, motivál. A dopamin tesz minket hatékony, felderítő, kíváncsi lényekké. Az élmény kialakulása nem szűkíthető le egyetlen agyi területre, hanem egy széles hálózatban keletkezik. Nézzük részletesen, hogyan jön létre ez az érzet.

Amikor egy vártnál nagyobb jutalom történik (pl. váratlan dicséret, nyeremény, sikeres válasz) a ventralis tegmentális area (VTA) dopaminsejtjei fokozott kisüléssel reagálnak (burst firing). Ez a dopaminjel különböző célterületekre terjed szét.
Az örömöt, a motivációt a nucleus accumbens (ventrális striátum) aktivációja váltja ki. A nucleus accumbens aktivációja összetettt neurokémiai változásokat vált ki.

1) aktiválódik egy örömre specializált limbikus áramkör (a limbikus rendszer ugye nagyon fontos az érzelmek és a tudatosság kialakításában),

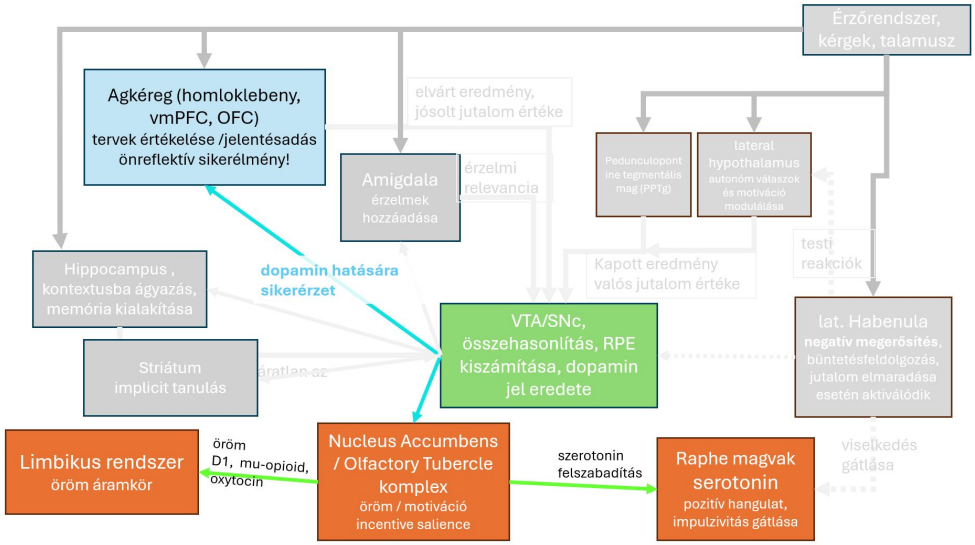
2) Aktiválódik az opioid rendszer, mely az agyban elszórt μ-opioid receptorokon keresztül az örömélményt fokozza,

3) oxytocin, a boldogsághormon szabadul fel, mely erősíti a társas kapcsolatokat és

4) szerotonin szabadul fel, mely stabilizálja a pozitív hangulatot és csökkenti impulzivitást.

Mindeközben a ventromediális prefrontális kéreg (vmPFC) és az orbitofrontális kéreg (OFC)

összeveti a várakozást és a kimenetelt, és jelentést ad a történteknek, kialakul az önreflektív, tudatos sikerélmény. Ez az, ami miatt tudatában leszünk, hogy „Tudom, hogy jól csináltam valamit". Végül a hippokampusz kontextusba helyezi (hol, mikor, mi történt), és tárolja a sikeres helyzetet a memóriában, melyhez az amigdala pozitív érzelmeket rendel. Ha legközelebb hasonló helyzetbe kerülünk jól érezzük magunkat, ezért törekszünk ilyen helyzetbe kerülni.



A jutalmazási folyamat során a tanulás mellett a dopamin másik hatása, hogy jutalomélményt vált ki. A vmPFC és az OFC kérgekben a pozitív RPE hatására kialakul a sikerélmény. Ugyanakkor a dopamin aktiválja a nucleus accumbenst is, mely a világoszöld nyilakkal jelzett útvonalakon örömérzetet vált ki. Részletek a szövegben.

A nucleus accumbens a döntési-tanulási folyamat mindkét fázisában fontos szerepet játszik. Nem csak a siker reklámozásában van szerepe sikeres cselekedetet követően, hanem a döntésekben is fontos. Amikor döntünk akkor a nucleus accumbens segít abban, hogy melyik lehetőség mekkora jutalmat igér. Ilyenkor nem a konkrét motoros parancsokat hozza meg, hanem súlyozza és serkenti azokat a mentális reprezentációkat (célok, várakozások), amelyek jutalomhoz vezethetnek. Azaz, segít eldönteni, melyik tervet vagy választási lehetőséget érdemes végrehajtani. Ha a környezet megváltozik, a NAc segít újrasúlyozni az alternatívák értékét és elősegíti a rugalmas döntéshozatalt.
A tanulási fázisban a dopamin a NAc-ben átírja az elvárható jutalom váratlanságát vagy annak hiányát (reward prediction error – RPE). Ez lehetővé teszi, hogy a szervezet megtanulja, milyen környezeti ingerek vagy cselekvések vezetnek pozitív kimenethez. Különösen fontos a stimulus–outcome asszociációk tanulásában (pl. egy hang → étel). Megtanulja, hogy egy inger vagy cselekvés „érdemes"-e végrehajtani.

A döntés-tanulás-döntés visszacsatolt körök eredményeként, korábbi akcióink hatása alapján a tanulás során újraértékelődik a jutalom és legközelebbi ígéretének nagysága is.

Egyszer hopp, máskor kopp: A jutalmazási rendszer és a tanulás működése különböző esetekben

Most hogy átvészeltük a jutalmazási rendszer irányításával működő felügyelt tanulás rendszerét és módszereit, nézzünk példákat is a működésére. Egy ingerre vagy egy

cselekedetre adott válasz, vagy annak hiánya többféle kimenetellel (jutalom, büntetés, vagy ezek elmaradása) járhat, és ennek megfelelően eltérő módokon tanulnak az érintett agyi területek.

Válaszunk jó: jutalmat kaptunk rá vagy elmarad egy kellemetlen következmény.

RPE>0

Ezt a két kimenetet hívjuk pozitív és negatív megerősítésnek. Mindkettő esetben érdemes tanulni. mert az RPE pozitív (a végkifejlet jobb vagy kevésbé rossz, mínusz x mínusz= plusz). A pozitív megerősítéses tanulás (jutalmazásos tanulás) lényege, hogy egy cselekvés vagy inger következtében pozitív kimenetel (jutalom) történik, melyet követően növelni kell a viselkedés valószínűségét. A második esetet azért hívjuk negatív megerősítésnek (nem pedig „büntetés"-nek), mert megerősítésről van szó, hiszen cselekedetünkkel jobb eredményt értünk el (elmaradt a büntetés), de nem pozitívan, egy jutalommal, hanem negatívan, a büntetés elmaradása útján értesülünk a sikerről. Ilyenkor is növelni kell a viselkedés valószínűségét, hiszen sikeresen kerültünk el egy büntetést.



'Nyalhat!' Jutalmazás a tanítógépben az Éretlenek című francia filmből.

Agyi mechanizmusok:
Dopamin szabadul fel főként a VTA-ból, és eljut:
-a dorzális striátumba – cselekvési tanulás és szokásformálás,
-a prefrontális kéregbe (PFC) – döntéshozás és előrejelzés fejlesztése.
-amigdala – negatív inger előjelzése,
-hippokampusz – kontextus tanulása,
-a ventrális striátumba (nucleus accumbens) – motivációs jelentőség növelése,
A dopamin D1-receptorokon keresztül szinaptikus megerősítést vált ki, különösen a kéreg-striátum kapcsolatban, de a PFCben is. Ez segíti a stimulus–outcome vagy action–outcome kapcsolat megerősítését.

Ide tartozik az a kicsit nehezen végiggondolható eset is, hogy valamit nem csináltunk és emiatt jártunk jobban. Ugye ebben az esetben vagy a pozitív végkifejlet vagy a negatív elmaradása miatt (pozitív RPE) a nemcselekvés választása a helyes, ilyenkor a striátumban a NoGo pálya erősödik.

Válaszunk nem jó, büntetést kaptunk rá vagy elmaradt a jutalom.

RPE<0

Büntetés vagy a jutalom elmaradása (mínusz x plusz = mínusz)
A büntetéses tanulás (pozitív vagy negatív punishment) lényege, hogy egy válasz negatív következménnyel jár (pl. fájdalom, vagy jutalom elmaradása), negatíve RPE-t eredményez.
A dopaminfelszabadulás csökken és ettől később csökken a válasz valószínűsége.
Agyi mechanizmusok:
-kellemetlen a kimenetel: laterális habenula aktiválódik és gátolja a VTA-t, melytől a dopamin-szint csökken.
-a várt jutalom elmarad: negatív predikciós hiba,
Szerepet kap:
-amigdala – félelem, elkerülés tanulása
-insula – averzív jelek feldolgozása,



Büntetés a tanítógépben az Éretlenek című filmben.

-PFC – szabálykövetés, cselekedet gátlása.

Itt is van egy kicsit nehezen átgondolható eset: Valamit nem csináltunk és emiatt rosszabbul jártunk. Ilyenkor a NoGo pálya gyengül, ez az üdvözítő megoldás.

Egy korábban jutalommal járó válasz már nem kap jutalmat
RPE<=0
Ezt a választ nem érdemes ismételnünk. Ekkor következik be a kioltás.


Hát ez üres!

1. Pozitív megerősítés kioltása: Ha egy korábban jutalomhoz vezető inger vagy cselekvés többé nem jár jutalommal, akkor a dopaminsejtek nem aktiválódnak, nincs pozitív megerősítés, a válasz fokozatosan gyengül.
2. Negatív megerősítés kioltása: Ha az elkerülő viselkedés már nem előzi meg a negatív kimenetelt, akkor az elkerülő válasz kihunyhat.
3. Büntetés kioltása: Ha egy válasz többé nem jár büntetéssel, a viselkedés visszatérhet. Ez érzékenyebb a környezeti kontextusra (hippokampusz és PFC szerepe).

A várt választ kapjuk
RPE=0
Ilyenkor valamennyi dopamin felszabadul, hogy megtartsa a helyesen beállított szinaptikus súlyokat. Ugye módosítani nem kell, hiszen azt kaptuk amit vártunk

Tipp: Aki még nem látta nézze meg az Éretlenek című filmet. Jelentős mennyiségű oxitocin és endorfin felszabadulással jár. Magyrul, sokat lehet nevetni.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agyi (meta)hálózatok összefoglalása: Visszatekintés – kitekintés

Az AgySétában eljutottunk a harmadik rész, a harmadik szerveződési szintlépés bemutatásának végére. Foglaljuk össze mit is tanultunk, mi újat tudnak a második szintű agyi (meta)hálózatok az idegsejtekhez (első rész) és (kis)hálózatokhoz (második rész) képest.

1. Az idegsejtek képesek jeleket integrálni és azokat akciós potenciálok formájában

digitálisan továbbítani. Az idegsejt hálózatok képesek mintázatokat párosítani (asszociálni, tanulni) egymással, melynek eredményeként egy mintázat előhív, kiegészít egy másikat vagy kategóriákba csoportosít, esetleg általánosít. A mintázatok előhívása automatikus, gyors, nem igényel keresgélést, a neuronhálózatok párhuzamos természetéből fakadóan.



Az agyban az első szintű, agyterületeket alkotó kishálózatok (agykérgi oszlopok), egy második szintű hierarchikus, visszacsatolásokat tartalmazó meta-hálózatba kapcsolódnak.

2. A kishálózatokból felépült agykérgi területek egy bonyolult, többszintű rendszerben előre és visszacsatolt (hierahikus) meta hálózatba kapcsolódnak. Az egymással kapcsolatban lévő területek (csomópontok) különböző absztrakciós szinten értelmezik a feldolgozott információt
3. A külső és belső ingerek feldolgozása az érzékelő (szenzoros) kérgeken történik. Az elsődleges agykérgek a másodlagos, majd asszociációs területeken továbbítják az egyre absztraktabbul feldolgozott információt.
4. A magasabb szintű asszociációs területeken: hippokampusz, amigdala, homloklebeny, kiértékelődnek az ingerek, összeszerelődik a MOST, a jelen élménye, és elkezdődik a válaszok, tervek kidolgozása
5. A tervezés köreiben az asszociációs kéregterületek, a törzsdúcok, a kisagy és a talamusz kölcsönhatásában kialakulnak és megszűrődnek a tervek, majd a mozgató kérgi hierarchián keresztül végrehajtásra kerülnek
6. A cselekedetek, gondolatok eredményét a jutalmazási rendszer körei kiértékelik. Ha egy terv alapján végrehajtott cselekvés, vagy elvont gondolat közelebb vitt a helyes megoldáshoz, akkor azt rögzítjük, tanulunk. Ellenkező esetben agyunk megtanulja gátolni vagy elfelejteni a hibás megoldást.
7. És ami fontos még: a fejlettebb élőlények (gerincesek) agya nem csak egy inger értelmező-válaszoló gép, mely a jelenben él (pl. rovarok), hanem a jutalmazási rendszer folyományaként motivációkkal, vágyakkal, fóbiákkal, azaz összetett belső hajtóerőkkel, viszonyulásokkal is rendelkezik, melyek hatékonyabb túlélést, a múlt és a jövő megélését hozza létre.



Rodin: A gondolkodó

A tudatosság felé vezető út jelentős részét megtette idáig az evolúció, mi is megtettük vele ezt a távot. Hova is jutottunk? Mi tudtunk meg arról hogyan éli meg az agy a világot?

Ez lesz a következőkben.

Szerző: **Gulyás Attila**

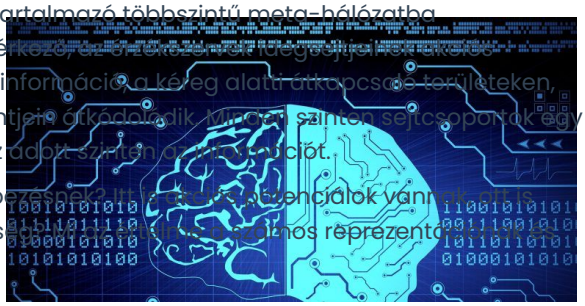
A világ többszintű megjelenése az agyban és a számítógépben.

Fussunk még egy kört a mintázatok, a kódolás és a reprezentációs szintek fogalmaival. A korábbiakban, amikor az idegsejtekről volt szó, a recehártyát, a szem fényérzékeny rétegét a CCD-chiphez, a telefonok és digitális fényképezőgépek képrögzítő egységéhez hasonlítottam. Ahogy a CCD kamera, úgy a szemben található idegsejtek is digitalizálják a világot, alacsony és magas jelszintek által kódolt számokká alakítják, majd ezekkel végeznek műveletet.

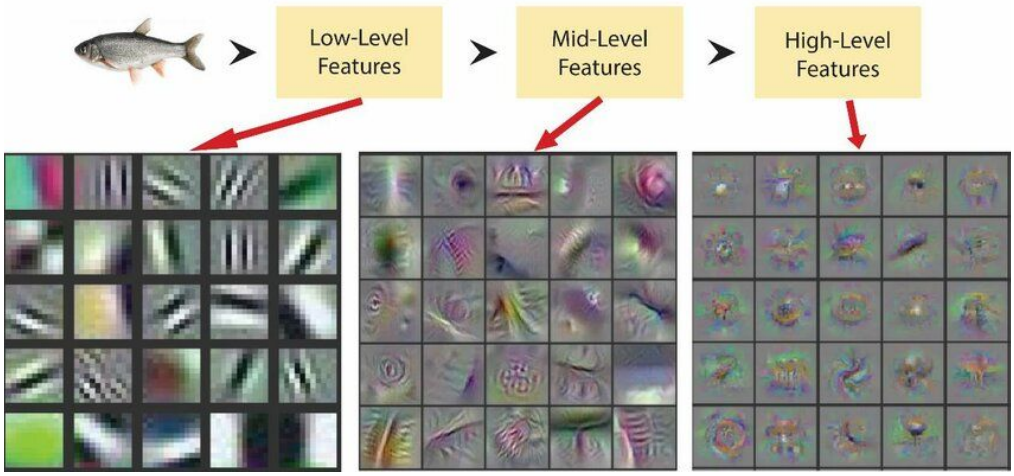
Mondhatjuk azt, tehát, hogy nem csak számítógépeink, hanem agyunk is digitálisan működik. Digitális formában jelentősen könyebb a jelek manipulációja, ezért minden mintázat, az agyban is és a számítógépben is.

Legutoljára azt jártuk körül, hogy a kis hálózatokból álló agykérgi területek egy második

szintű, visszacsatolásokat és köröket is tartalmazó többszintű meta-hálózatba kapcsolódnak. Mint láttuk a külvilágból é[illegible] potenciál kisülési mintázataiban kódolt i[illegible] majd az agykéreg egyre magasabb szint[illegible] mintázata aktiválódik, és ez hordozza az [illegible]



De mi értelme ennek a többszörös leképe[illegible] akciós potenciálok vannak. Mi a különbs[illegible] reprezentációs szintnek?



A reprezentáció szintjei egy képfelismerő deep-learning hálózatban. Balról jobbra haladva egyre összetettebk az elem amiket az egyes sejtek felismernek. A látórendszerben is ez történik, csak onnan nehezebb kiolvasni, mint egy mesterséges neuronhálózatból.

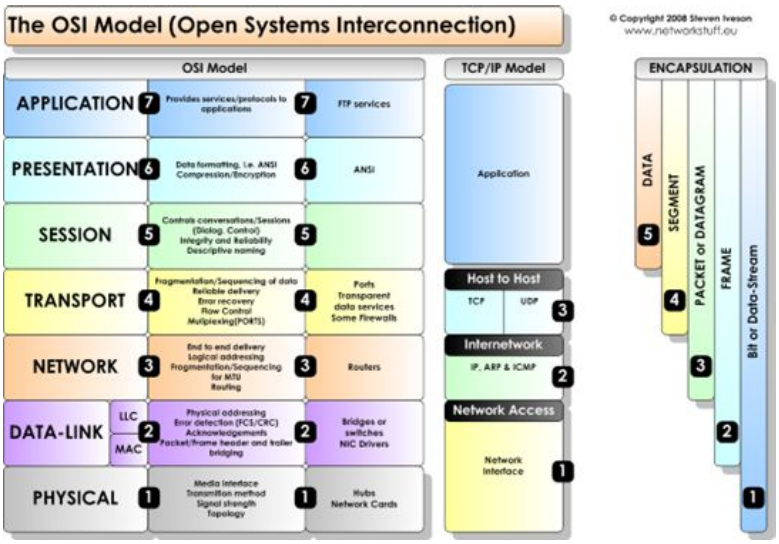
A látókéregnél láttuk, hogy az egyes feldolgozási lépések a recehártyán kialakult képből más típusú információkat vonnak ki, más jellegzetességet kódolnak (vonalak, szögek, irányok, mit látunk?, hol van?, merre mozog?).

Továbbhaladva, az asszociációs területek mintázatai azt hordozzák: hogyan viszonyuljunk a dologhoz?, mire lehet használni?, mit tudtunk meg korábban róla? Azaz az egyes lépésekben (egymás utáni agyterületeken) az eredeti információ más vonását hordozzák az akciós potenciál mintázatok.

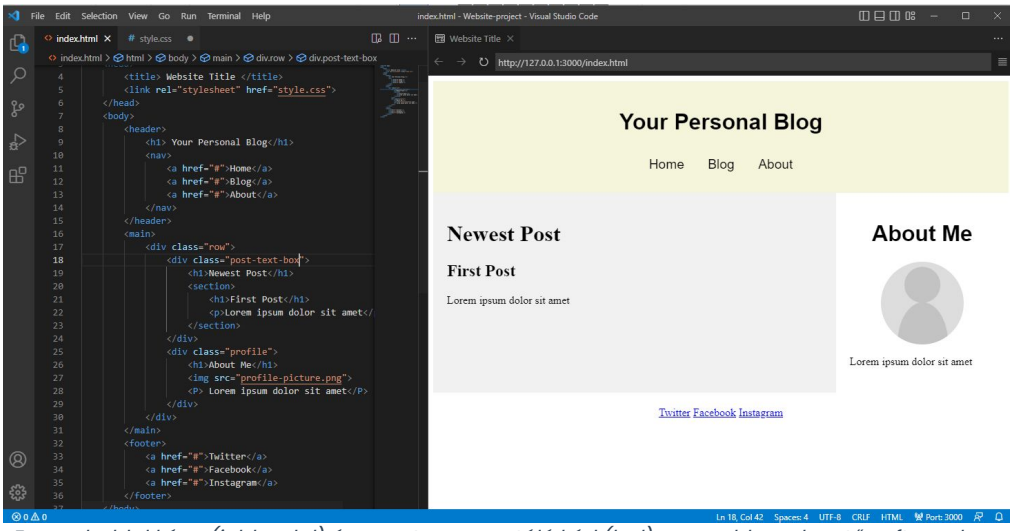
Vegyük elő és építsük tovább az agy-számítógép összehasonlítást, melyet Neuman elkezdett. Újabb hasonlóságokra bukkanunk, melyek segíthetnek megérteni a többszintű reprezentáció értelmét. Egy internetes oldal megjelenítése egy igen szemléletes példája annak, hogy ugyanaz az információ sokféle módon reprezentálható, máshogy kódolható és máshogy használjuk. A reprezentáció a latin "*re-presentare*", újra, máshogy, más helyett-bemutatni kapcsolatból ered és azt jelenti, hogy valamit egy más módon mutatunk be, más jellegzetességeit kódoljuk.

Amikor számítógépünkön egy weboldalt nézegetünk, az egy hozzánk közel álló, ám a számítógép számára nehezen érthető reprezentáció (szöveg és kép ízléses elrendezése a képernyőn). Egy weboldalt, mielőtt böngészőnk kirajzolná nekünk, egy HTML típusú (hipertext markup language) adatállományban (és a hozzá kapcsolódó képfilékben) kapja meg. Ez egy kicsit elvontabb megjelenítése ugyanannak. Ember által is olvasható, számítógép nyelven van leírva, hogy mi a tartalom (szöveg, kép) és ezt hogyan kell majd elrendezni az oldalon. Ennek (ezeknek) az adatállomány(ok)nak (file/k) azonban valahogy el kell jutnia a szolgáltató számítógéptől a mi gépünkre.A gépek erre egy egyezményes eljárást a http-t (hipertext transfer protocol) használják. Biztos mindnekinek ismerős a http://wikipedia.com cím. No ez azt mondja meg a szolgáltató gépnek, hogy én egy http eljárás szerinti ilyen és ilyen adatállományt kérek. Ahhoz, hogy ez eljusson hozzánk a kérést és a visszaérkező

adatot is el kell küldeni a két gépnek egymáshoz.

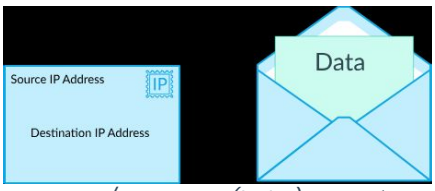


A reprezentáció szintjei egy számítógépben.



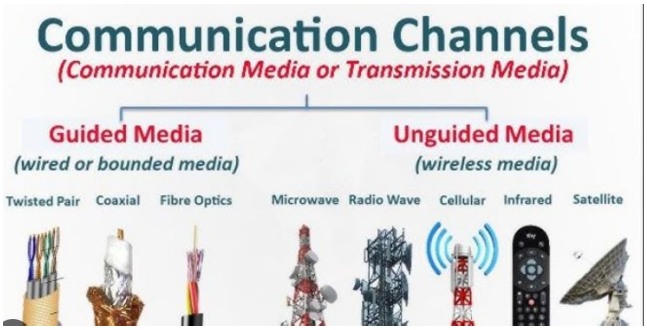
Egy weboldal képe (jobb odal) és az azt reprezentáló kód (bal) egy webszerkesztő softwareben.

Mint ahogy a lassan kihaló csigaposta esetében levelünket borítékba kellett tennünk, majd a borítékot a címzett és a feladó nevével ellátnunk, hogy eltaláljon a címzetthez, és az tudja kinek kell válaszolni, a HTTP protokol a HTML filét is begyömöszöli egy csomagba. Ennek formáját a TCP/IP protokoll (transfer control protocol/ internet protocol) szabja meg. Ezek a csomagok gépünk hálózati kapcsolatán keresztül jönnek-mennek. Azután attól függően, hogy milyen ez a kapcsolat: üvegszál, ethernet kábel vagy WiFi, gépünknek először fel kell vágnia egymással összetartozó kisebb csomagokra és azokat kell továbbküldenie. Ugye egy elkészült házat se igen szállítanak egyben, hanem a szállítás módjától függően kisebb vagy nagyobb egységeke csomagolják. Mivel a fenti kapcsolatok mindegyike digitális, azaz 1-esek és 0-ák mehetnek csak, a csomagot még át kell alakítani bitekké, és ezeket kell elküldeni a csatornán. Az üvegszálba egy ki be-kapcsolódó lézer küld 0/1 impulzusokat. Az ethernet kábel rézdrótján 0 és 5 volt között ugrál a jelszint, míg a WiFi különböző frekvenciákon bonyolult módon elrendezett rádióhullámokat használ. A pontosság kedvéért meg kell jegyezzem, hogy itt néhány közbeeső reprezentációs szintet



Egy TCP/IP csomag (balra) ugyanúgy tartalmazza a feladót, a címzettet és az adatot, mint egy csigaposta boríték (jobb).

nem mentünk végig, hogy a példa ne legyen feleslegesen hosszadalmas.



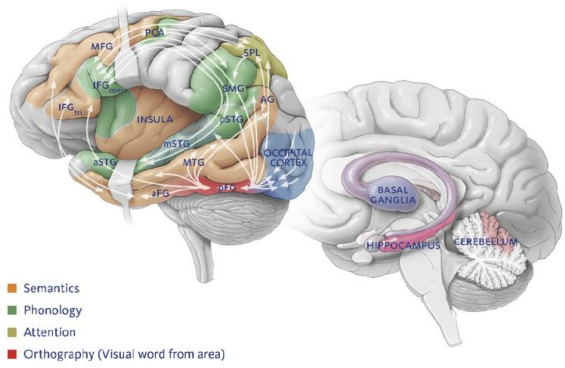
A legalacsonyabb szintű reprezentáció továbbítására alkalmas fizikai rendszerek. Feszütségszintek, fényfelvillanások vagy rádióhullámok viszik a 01 sorozatokat.

Tehát a weboldal, amit látunk, több szinten reprezentálódik: képként a monitoron, HTML fileként, HTTP üzenetként, TCP/IP csomagoként, fény, feszültség vagy rádióhullám formájában. A jel fizikai hordozója a számítógépben mindeközben az integrált áramkörökben szaladgáló alacsony vagy magas feszültségszint (az átvitelre használt fényimpulzusokat vagy a rádióhullámokat leszámítva).
Azaz, ha a számítógép memóriájában ránézünk a megfelelő programok által kezelt reprezentációkra akkor mindenhol csak nullákat és egyeket látunk. Ráadásul az eltérő helyeken ugyanazt a dolgot máshogy reprezentáló 0-1 mintázatokat látunk. Egy tetszőleges 01 sorozat, csak a megfelelő helyen értelmeződik megfelelő módon.
Folyt. köv. hogyan működik a többszörös reprezentáció az agyban

Szerző: **Gulyás Attila**

A világ többszintű megjelenése az agyban és a számítógépben II.

Az előző bejegyésben bemutatott többszintű reprezentáció megtalálható az agyban is. Az elsődleges érző kérgektől az érzékszerv-független asszociációs területekig az információ sejtcsoportok akciós potenciál mintázatában hordozódik, de területenként más a jelentése (a reprezentáció módja).



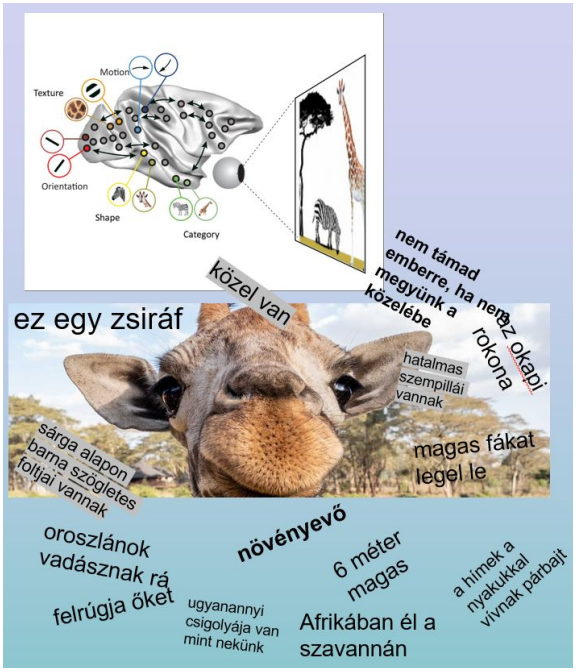
A beszédértés feldolgozásának agyi hálózta. Egy tucat terület kapcsolódik több szinten és visszacsatolva egymáshoz. Mindegyik szint saját reprezentációt használ, melyek összekapcsolódnak a többi terület reprezentációjával.

Az fontos itt, hogy az egymás után kapcsolódó feldolgozási (és mint láttuk ugyanakkor memória) szintek nem egy egyenes láncba, hanem egy erősen visszacsatolt, köröket és elágazásokat is tartalmazó meta-hálózatba kapcsolódnak. Amikor felfelé halad a feldolgozás akkor az egyszerűbb reprezentációk mintázataihoz összetetteb reprezentációk asszociálódnak. Pontok alkotnak egy vonalat, azok szögeket, az egy A alakot, az egy „A" betűt. Ugyanez megtörténik mondjuk a hangokkal is, kialakul az „A" hang reprezentációja (két értelemben is a zenei és a fonetikai A-é), majd magasabb szinten az „A" fogalma.
A visszacsatolások komoly extrákat adnak a feldolgozáshoz. Ha hallunk egy A hangot, fel tudjuk idézni az A leírt képét is, mivel az asszociációk a hálózatok között kétirányúak. Egy magasabb terület mintázata az alacsonyabb területen kiváltja a hozzá tartozó mintázatot,

mely tovább terjed lefelé. A különböző területeken összefonódó mintázatok alkotják egy-egy tárgy, esemény modelljét, azáltal, hogy agyunkban automatikusan bekapcsolnak a korábbi asszociációk eredményeként összetartozó mintázatok.



'A': lehet nyomtatva, rajzolva, vésve, valaki kiejtheti vagy megszólaltathatja egy hangszeren. Számos agyterületen reprezentálódik, de valahol a homloklebenyben létezik egy absztrakt, modalitás független A reprezentációja, mely képes előhívni az alacsonyabb szintek reprezentációit.



A többlépcsős feldolgozás során az agyterületek összekapcsolt jelfeldolgozásának eredményeként a magasabb területeken kialakulnak a tárgyakat és jelenségeket leíró modellek, melyek tartalmazzák az információt a dolog összes eleméről. Azt is amit épp nem érzékelünk. A feldolgozási lépcső minden agyterülete hozzájárul az aktiválódott modell elemeinek összerakásához.

Ha meglátunk az állatkertben egy zsiráfot, vagy látunk róla egy fényképet, neadjisten kapunk egy plüss zsiráfot, akkor az alakja és mintázata alapján előhívjuk a zsiráf modellt, és a különböző agyi területeken hozzá tartozó mintázatokat. Az egyes területek az összképhez hozzáteszik mindazt a tudást, amit az aktiválódó mintázatok hordoznak a különböző szintű, eltérő reprezentációkkal rendelkező agyterületeken. Látókérgünk tudja, hogy sárga alapon barna sokszögek tarkítják, kicsit magasabb szintem azt is látjuk vagy tudjuk, hogy hatalmas, szép szeme van és lila a nyelve, nagy állat, alapjában nem kell tőle félni (amigdala), mert növényevő, bár ha az oroszlánok megtámadják jól felrúgja őket. Hippokampuszunk és homloklebenyünk tudja, hogy magas fák levelét legeli, a szavannán él és a hímek nyakukkal vívnak párbajokat. Azt is magunk elé tudjuk vetíteni Afrika térképén, mely területeken él. Egy hierarchikus modell elemei tehát számos szinten, azonnal sok mindent előhívnak az összetett, párhuzamos, de eltérő szintű reprezentációkból. Amikor érzékelünk valamit agyunkban, megelevenedik a hozzá tartozó tudás, megjelenik egy gazdag belső kép. Ez egy elég jó első lépés a tudat

élményéhez.



A hallucinációk és sugallatok egy beteg agy számára a valóságot jelentik. Nem tud különbséget tenni hogy egy agyi modellt egy belső folyamat vagy egy külső inger aktiválta.

De a gazdag sokszintű reprezentációkból bajok is származhatnak, skizofrénia, téveszmék, hallucinációk vagy csak álmok, rémálmok formájában. Ilyen esetekben az érintettek számára az aktiválódott belső modellek valóságnak tűnnek, azonban nem, vagy rosszul működnek azok az agyi ellenőrző körök, amelyek jelzik, hogy mi a külső és mi a belső világ által aktivált modell. Amikor egy skizofrén arról számol be, hogy valaki parancsokat ad neki, akkor tényleg megjelennek hallókérgében a hallásfeldolgozásra jellemző mintázatok. Aktiválódik az elsődleges és másodlagos hallókéreg, a Broca terület és az anterior cingulate terület (AAC). Számára ez a fura módon aktiválódott modell, mintázat a valóság és azt valóságnak éli meg, hallja.

Két gondolatmorzsa még, amit a téma belső modellje agyam valamelyik rekeszéből előhívott:
Egyrészt, míg a számítógépnél szigorú szabványok szerint kialakított műveletek alakítják a biteket, addig az agy esetében a tanulási történet alapján meghatározott egyedi kódolások alakulnak ki minden egyes területen (a neuromorf depp-learning AI hálózatokban (pl LLM-ek, ChatGPT, etc.) is így van). Mint amikor az erdőben elveszett két gyerek egy saját nyelvet alakít ki. Ahogy csak ők értik egymást, az agykéreg kódok is egyediek és csak egymás között értelmezhetők. Ezért mondhatjuk azt bátran, a Kismacska meséje alapján, hogy ha valakinek az agyából egy darabot átültetnének az enyémbe semmi hasznát nem venném. Idegsejtjeim nem értenék azokat a jeleket, amelyeket a beültetett agydarab küldene. Az már egy másik kérdés, hogy lehet idővel összetanulnának.

Másrészt, kitekintésként egy érdekes párhuzam. Bár a könyv témája távol áll a keleti (klasszikus indiai, buddhista) és nyugatiasított keleti (a 19. század teozófiája) filozófiától és félreértés ne essék, nem akarom a manapság oly divatos módon belekeverni a buddhizmussal fűszerezett kvantummechanikát a tudat megértésébe, az ilyenektől hideglelésem van, de, ezek az eszmerendszerek megpróbáltak egy modellt alkotni a világról és annak strukturált leírását adni. Attól függetlenül, hogy a rigorózus tudomány kísérleteken és megfigyeléseken alapuló próbáját nem állták ki, még hordoznak érdemes gondolatokat.
Az összekapcsolódó jóga és meditációs gyakorlatok gyakran dolgoznak a csakrák fogalmával. A fenti tradíciók szerint testünk-szellemünk 3-5-7 (gúnák, kóshák, csakrák) létszinten nyilvánul meg, a fizikaitól, a tudatoson át, az isteniig. Minden egyes szintnek megfelel a 7 csakra egyike, alulról felfelé haladva. A modern tudomány ugyan nem talált a csakráknak megfelelő képződményeket, de szimbólikus elemekként jó fogódzó pontot adnak jóga és meditálás közben a figyelem irányításához, és a fentiekhez hasonlóan egyfajta szerveződési és reprezentációs szinteket jelképeznek. És persze itt is vannak lefelé és felfelé terjedő hatások.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az emberi gondolkodás plusszai: belső állapotok és többlépcsős gondolkodás

Amit a fentiekben összefoglaltunk, az megfelel egy közepesen fejlett emlősállat érzékelésének, tervezésének, döntéseinek, tanulásának és az azokban résztvevő visszacsatolásoknak. Az emberi agy evolúciója során azonban megjelent egy nagyon fontos új visszacsatolás a homloklebeny továbbfejlődése során.

Az egyszerű elmék reaktívak, ha történik valami a környezetükben reagálnak. Ezzel szemben az emberek (és egyéb fejletteb tudatú állatok: elefántok, cetek, papagájok, varjúfélék, lábasfejűek) nem csak ingerekre reagálnak (stimulus-outcome) vagy egyszerű akciókat hajtanak végre (action-outcome), hanem:



Az egyszerű elmék reaktívak, azaz a környezet ingerei hajtják őket. Az összetettebb elmék működését belső állapotaik, emlékeik, céljaik is hajtják.

-egyrészt rendelkeznek bonyolult belső késztetésekkel (memóriában tárolt feladatok, hosszútávú célok), melyekre válaszokat dolgoznak ki belső késztetésre,

-másrészt, egy-egy ilyen megoldás kidolgozása több, egymás után kapcsolt tervezés-akció-kiértékelés-tanulás lépésből áll.

Egy agyunkban felmerült feladatra megszületett (rész)megoldás nem vált ki szükségszerűen azonnal egy mozgásban megnyilvánuló választ, hanem a megoldás és az abból fakadó szempontok, lehetőségek, visszakerülnek ugyanebbe a tervező rendszerbe és a megoldás tovább csiszolódik (az ingerre kapott válasz új ingerként ismét bekerül a rendszerbe). Számtalan körön keresztül, iteratív módon jutunk el a megoldásig, gondolkodunk, gondolatmeneteink vannak! Ugye, már megint a visszacsatolások amik új dolgokra tesznek képessé minket.

2025-ben az AI szakirodalom is felismerte az emberi gondolkodásnak ezt a fontos elemét, és CoT, azaz „Chain of Thought", gondolati lánc, néven kezdte el alkalmazni az érvelések finomításához.

Ezek az extra körök, persze extra elemenként járulnak hozzá tudatosságunkhoz. Nem teljesen a jelenben és csak az ingerekbűvöletében élünk, hanem ÉNünk, tudatunk, céljainkat, gondolatmenetünket, emlékeinket is magában foglalja.

Hogyan is történik mindez?

Ne felejtsük, az agy idegsejtjei mintázatokkal dolgoznak. Számukra egy elvont feladat kiindulópontja ugyanúgy mintázat, mint egy külvilági inger. Ugyanígy, a megszületett megoldás idegsejt mintázata lehet egy mozgást kiváltó mintázat, de lehet egy olyan mintázat is, amely aztán kiindulópontként szolgál a következő tervezési-kiértékelési kör számára.

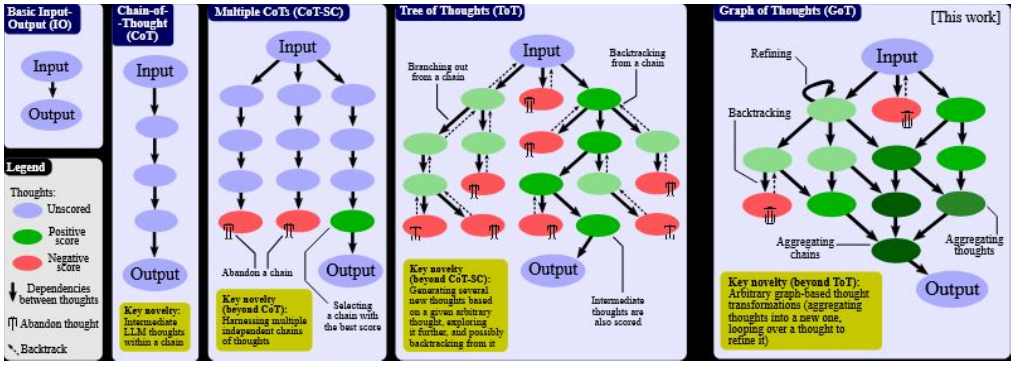
Elevenítsük fel az alap mozgástervezési kört:

1. inger érkezik vagy megoldandó feladat merül fel
2. az érzékelő ágon az agykérgi hierarchia ezt feldolgozza, vagy a homloklebeny értelmezi a feladatot
3. ezután jönnek a tervezés hurkai (lásd feljebb), melynek során a kéreg-törzsdúcok/

kisagy-talamusz körökben kiválasztásra kerül a legjobb megoldás
4. a megoldást a motoros rendszer végrehajtja
5. erre történik valami a környezetben, megkapjuk vagy nem kapjuk meg a büntetést vagy a jutalmat
6. agyunk a jutalmazási rendszer segítségével kiértékeli a dolgokat és az RPE-nek megfelelő mennyiségű dopamin tájékoztatja az agyat arról, hogy most tanuljon vagy ne, boldog legyen vagy ne

Ezt a többlépéses gondolkodáshoz -anélkül, hogy a lényege és lépései megváltoznának – újra kell fogalmazni:

1. **megoldandó feladat merül fel, kerül elő a memóriából, vagy egy részmegoldásból indulunk ki**
2. a homloklebeny értelmezi a feladatot
3. ezután jönnek a tervezés hurkai (lásd feljebb), melynek során a kéreg-törzsdúcok/ kisagy-talamusz körökben kiválasztásra kerül a legjobb megoldás
4. **a megoldás nem kerül a motoros rendszerbe, hanem a kidolgozásától részben független homloklebeny terület (orbitofrontális kéreg, OFC) értékeli mennyire jó és az értékelést átadja**
5. a jutalmazási rendszernek, majd az RPE-nek megfelelő mennyiségű dopamin tájékoztatja az agyat arról, hogy most tanuljon vagy ne, boldog legyen vagy ne
6. ha a megoldás közelített a célhoz **visszakerülhet további csiszolásra** (prelimbikus kéreg, PLC) és mellesleg a jutalmazási rendszer aktiválódik, hogy az rögzüljön, ha nem, visszalépünk és egy másik megoldást próbál agyunk kidolgozni.



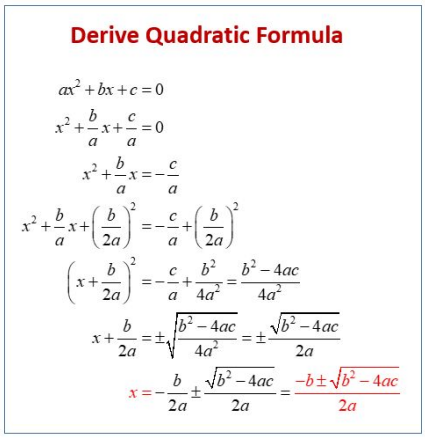
Ezt az ábrát az AI szakirodalomban leltem, de jól bemutatja a többlépcsős gondolkodás esszenciáját és lehetőségeit. A baloldali kétlépcsős gondolati lánc az egyszerű, reaktív érvelést mutatja be. A második oszlop a többlépcsős érvelést. A 3. oszlop azt mutatja be amikor párhuzamosan indítunk gondolati láncokat, melyek közül egyesek elhalnak. A 4. oszlop egyfajta Darwinista, szelekciós megközelítést mutat be, ahol a gondolatok elágaznak (replikáció és mutáció), egyesek ágak elhalnak (szelekció) és a működő ágak ágaznak el újra. Az 5. oszlop azt mutatja, hogy a gondolatok egymásba is olvadhatnak, ekkor nem faként, hanem gráfként tekinthetónk az érvelés folyamatára. Forrás: https://arxiv.org/pdf/2308.09687

Ezt a visszalépést, újra próbálást, akár egyfajta Darwini természetes kiválasztódáshoz is hasonlíthatnánk. Ugyan nincs egyszerre sok „utód gondolat”, mindig egy szálon halad a továbblépés, de ugye itt is van mutáció (tovább gondolás) és szelekció (értékelés), mely több lépésben jobban túlélő (az feladat elvárásait teljesítő) megoldáshoz vezet.

Ami fontos még, hogy egy jól sikerült gondolat is képes a jutalmazási rendszert elindítani, azaz az agy saját magát is tudja jutalmazni. Ugye itt nem az érzékszervek felől jön a megerősítés, hanem a homloklebeny felől, hiszen azt kell felmérni, hogy a megoldás mennyire illeszkedik a lehetőségekhez, mennyire új, és hogy közelebb visz-e a célhoz. Ezután, mint korábban láttuk, nem csak megtanuljuk a helyes részlépést és több körön keresztül az

érvelési láncot, hanem sikerélményünk is lesz és boldogok leszünk (a NAc közbenjárásával). Ha a soklépéses megoldás bevált és többször is használjuk a Nucleus Accumbenr (NAc) részvételével egylépésessé redukálódik. Itt is működik ugye a Hebb szabály, az első és az utolsó lépés együtt (időben közel) fordul elő, ezért az eredeti bemenet képes kiváltani a soklépcsősen kidolgozott választ.

A másodfokú egyenlet megoldóképletének levezetésére már nem feltétlenül emlékszünk, de tudjuk használni. Egy bonyolult csomó megkötésénél eleinte még odafigyelünk arra, hogy a kötélnek hol kell átbújnia, de egy idő után már értelmezés nélkül, rutinból kötjük.



Ki emlészik már a másodfokú egyelet megoldóképletének levezetésére (fekete)? Csak a végét jegyeztük meg (piros). Agyunk a kérdés és a válasz közötti lépésekre egy idő után nem emlékszik, rövidíti a kacskaringókat, hogy hatékonyabban működjön, mást is tudjon tanulni.

A jelenlegi AI-ból pont ezek a belső állapotok, késztetések és visszacsatolások hiányzanak. Többek között azért, mert a deep learningben használt back-propagation, visszaterjedéses tanulás nehezen tűri a visszacsatolásokat. De ebbe mélyebben itt most nem mennék bele.

Nyilván éveken belül ezeket is beépítik majd az AI fejlesztők akik, mint korábban neurobiológusoktól kérnek tanácsokat.

És akkor ezzel le is zárjuk a harmadik szintlépést. Jöhet a negyedik rész, mely a tudatosság dinamikájáról és annak következményeiről szól majd.

Szerző: **Gulyás Attila**

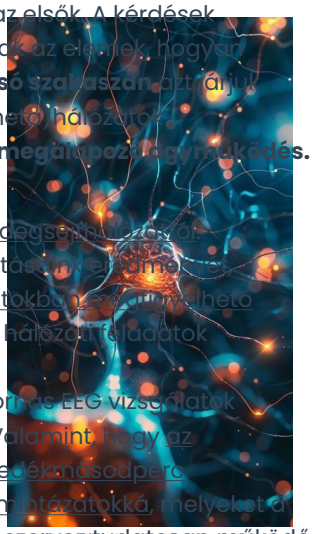
Beköszöntő a SzürkeÁllomány negyedik évadához

Elértünk az #agyséta utolsó szakaszához. Az idegsejtek, a hálózatok, az agyi metahálózatok után továbbhaladunk és megnézzük hogy az agyterületek pillanatonként változó kölcsönhatásából hogyan áll össze a tudatosság, az Én, a világ átélése, hogyan táncolnak a gondolatok és hogyan csillognak az agyi mintázatok.

Az előző részben az agyterületek szakosodásáról és egymásra épülő, hurkokat is tartalmazó feldolgozási láncolatáról beszéltünk.

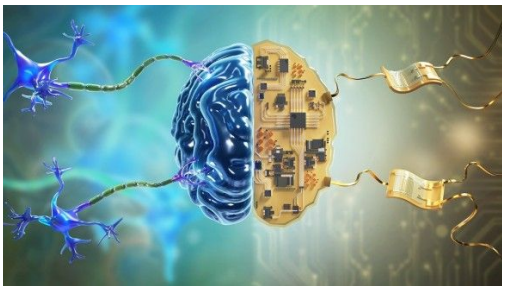
Elsősorban a struktúrával, **a hardwarrel, azaz az anatómiával foglalkoztunk**, azzal, hogy milyen területek, hogyan kapcsolódnak egymáshoz, és milyen feladatokat oldanak meg. Amikor a séta elején egy összetett rendszer megértésének lépéseit vettük át, a strukturális,

szerkezeti kérdések (mi, mennyi, hogyan van összekötve) voltak az elsők. A kérdések második felét a működési, élettani kérdések tették ki (mit csinálnak az elemek, hogyan hatnak kölcsön, ebből milyen működés fakad). Az #agyséta **utolsó szakaszában ezt tárjuk** körbe, hogy az agykérgi és agyi területekből álló magasrendű (meta) hálózatok kölcsönhatásából **hogyan alakul ki a dinamikus, tudatosságot megalapozó agyműködés. Milyen a software és hogyan fut a hardwaren?**



Csillogó idegsejtek, csillogó agyat alkotnak

- Elsőként, átismételjük miket is várunk el elméleti alapon egy idegsejthálózattól.
- Ezek után, „A tengericsikó meséjében” bemutatom saját kutatásainkat, amelyek megvizsgálták hogyan alakulnak ki az idegsejthálózatokban megfigyelhető aktivitásminták, melyek alkalmasak lehetnek az eltérő típusú hálózati feladatok megoldására.
- Ezt követi majd annak áttekintése, hogy az fMRI és a sokcsatornás EEG vizsgálatok alapján mit tudtunk meg az agyterületek kölcsönhatásáról. Valamint, hogy az agyterületek működése hogyan hangolódik milliméter és töredékmásodperc felbontással, térben és időben állandóan változó dinamikus mintázatokká, melyeket a homloklebeny a kéreg alatti moduláló területek segítségével szervez tudatosan működő aggyá.
- A sétát majd néhány filozófia kitekintéssel és az agy-számítógép-AI párhuzamok megvizsgálásával zárjuk. De mint már korábban is írtam, a tudat kemény problémájával, a kváliák, az átélés élményének kialakulásával nem foglalkozunk, mert nem lehet a tudományos módszer igényeinek megfelelő módon vizsgálni.





Mielőtt belevágunk, kérem az olvasók türelmét, ugyanis mielőtt a SzürkeÁllomány negyedik évadát elkezdjük, elmegyek egy rövid szabadságra. Érdemes lesz várni 😊, most kerül fel a hab az agy sokrétegű tortájára.

Szerző: **Gulyás Attila**

Mit várunk el egy hálózattól? Az agykérgi területek működésének időosztásos működése (multiplexelése)

A második rész (Az idegsejthálózatok működése) fejezeteiben bemutattuk azt, hogy egy idegsejtekből szerveződő hálózat lehet előrecsatolt és visszacsatolt. Szerkezetétől függően képes egyszerű döntésekre, vagy tanulás útján a döntéseket módosítani. A mátrixmemóriánál megtudtuk, hogy egy hálózat képes lehet 1) információt előhívni, 2) információt tárolni 3) információt feldolgozni, manipulálni. Azaz asszociációkat, társításokat végezni, melynek eredményeként képes a) mintázatokat átalakítani, egy mintázathoz egy másikat rendelni, b) mintázatokat előhívni, c) mintázatsorozatokat előállítani, d) mintázatokat kiegészíteni, e) elválasztani (kategorizálni, ortogonalizálni); esetleg ennek ellentéteként f) éppenséggel mintázatokat általánosítani (több mintázatot is ugyanabba a csoportba sorolni).

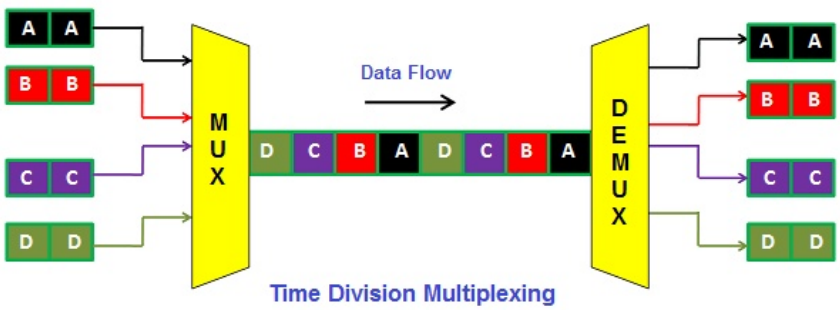


A visszacsatolt neuronhálózatok működését domborzati hasonlattal bemutató ábra. Részleteket a hivakozott bejegyzésben.

> A visszacsatolt hálózatok esetében azt a megközelítést is bemutattuk, amikor a hálózat aktivitásának alakulását egyfajta energia (potenciál) tájképen, a domborzat szerint a völgyek vagy a hegycsúcsok felé folydogálással, felmászással írtuk le. Az, hogy egy hálózat milyen eredményre jut (milyen mintázat lesz a kimenet) két dologtól függ, egyrészt, hogy a korábbi tanulás során beállított szinaptikus súlyok milyen domborzatot (attraktorokat) határoznak meg, másrészt, hogy a tájkép mely pontjáról indul a megoldás keresése. Hogy a tájképen merre haladunk, hogyan fejlődnek az idegsejt mintázatok, azt a feladat és a kiindulási állapot szabja meg, a tájképen többféle képpen lehet keresgélni, mehetünk a völgyekbe lefelé vagy a hegycsúcsokra fölfelé. Ebben a megközelítésben is megjelennek eltérő típusú feladatok.

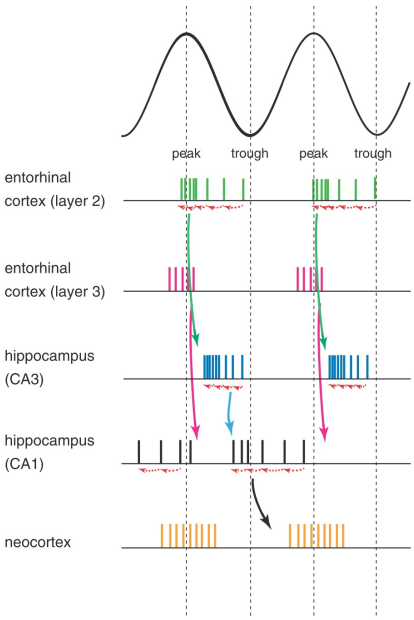
A fenti feladatlista meglehetősen hosszú és úgy tűnik az agykéreg serkentő és gátlósejtekből álló hálózata nem is tudja mindet egyszerre tökéletesen elvégezni. Amikor tárolunk, nem hívunk elő jól, amikor kategorizálunk nem tudunk éppenséggel jól általánosítani, hiszen pont ennek ellentéte a célunk.

Mindezek alapján a hálózatoknak egymásnak ellentmondó működési állapotaik vannak. Ahhoz, hogy egy hálózat az információ fogadás, tanulás, feldolgozás



Az időosztásos feldolgozás lényege, hogy a feladatokat nem egyszerre végezzül el, vagy egy információs csatornán a jeleket nem egyszerre küldjük át, hanem gyors egymásutánban.

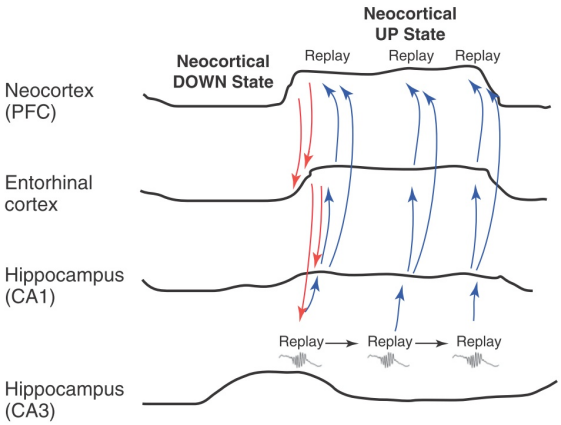
egymásnak ellentmondó feladatait helyesen tudja megoldani, az állapotok között időben gyorsan kell váltania. A híradástechnikában, számítástechnikában sok feladat egymás utáni megoldásának szervezését **időbeli multiplexelésnek** (**időosztásos feldolgozásnak**, time-division processing) hívják. Ilyenkor egy információ átvivő csatornán (Wi-Fi csatorna, optikai kábel, telefondrót) gyors egymásutánban eltérő címzetteknek szóló információcsomagokat küldenek rövid, egymás utáni időszakokban (időosztásban). Hasonlóan, egy operációs rendszer a futó programoknak gyors egymásutánban, rövid időkre, felváltva adja oda a processzor (CPU) feldolgozási kapacitását. Sorban (serial) történnek a dolgok, egyenként, de a sebesség miatt egyidejűnek, párhuzamosnak (parallel) tűnnek.



A felderítő viselkedést mutató állatban megfigyelhető theta oszcilláció alatt a hippokampusz bemenetéül szolgáló entorhinális kéreg és a hippokampusz egyes részei, illetve a neocortex egymástól időben eltolva, pontos időzítéssel működnek.

Erős érvek szólnak amellett, hogy az agyban is ilyen multiplexelés történik, valamint, hogy az egyes feldolgozási állapotok közötti váltakozás hozza létre az eltérő EEG mintázatokat.
Az agy működését agyi aktivitásszintek (fMRI) és EEG mintázatok váltakozásának finom összehangoltsága jellemzi. Az egyes állapotok alatt, az agyterületeken a serkentő és gátló idegsejtek aktivitásának szintje és mintázata eltér. Mint az EEG kialakulásának részleteinél láttuk, az EEG jelek millónyi sejt sokezer nyúlványán folyó viszonylag erős áramainak tér és időbeli átlagából megmaradt finom kis feszültségek. Egy idegsejt hálózatban a gátlósejtek, valamint a sejtek felszínén elszórt moduláló transzmitter receptorokon ható moduláló transzmitterek szabályozzák, hogy a serkentő sejtek dendritfájának és sejttestének mely részein milyen áramok milyen összehangoltságban folynak. Az egyes eltérő aktivitási szintű és szinkronitású állapotokban a neuronhálózatok tömegét adó serkentő sejtek egyes részeinek potenciálja a feldolgozási feladathoz igazodóan eltérő. Az EEG elektródokkal az állapotváltozásokat jellemző potenciálváltozásokat, periódikus változások esetén hullámokat figyelhetünk meg.

A sokcsatornás elvezetések (EEG és fMRI) elemzése alapján a kutatók feltételezik, hogy amikor az egyik hálózat (agyterület) elkészül a feldolgozással és az eredményt elkezdi továbbküldeni, akkor egy másiknak (vagy többnek) fogadó, majd információ feldolgozó vagy az ezzel ellentétes tanuló állapotba kell kapcsolnia megfelelő időzítéssel, mielőtt a keletkezett kimenetet továbbküldi (szintén pontos időzítéssel). Ezek az átkapcsolások nyilvánulnak meg pontosan időzített EEG jelek formájában.



Az agykéreg és a hippokampusz aktivitásának kölcsönhatása lassú-hullámú alvás alatt. A nyilak az információáramlás irányát mutatják a feldolgozási módok között átkapcsoló (és ezért EEG jel-átmenetet

mutató) agyterületek között. Az egyes területek prcíz időbeli viszonyban kapcsolnak be.

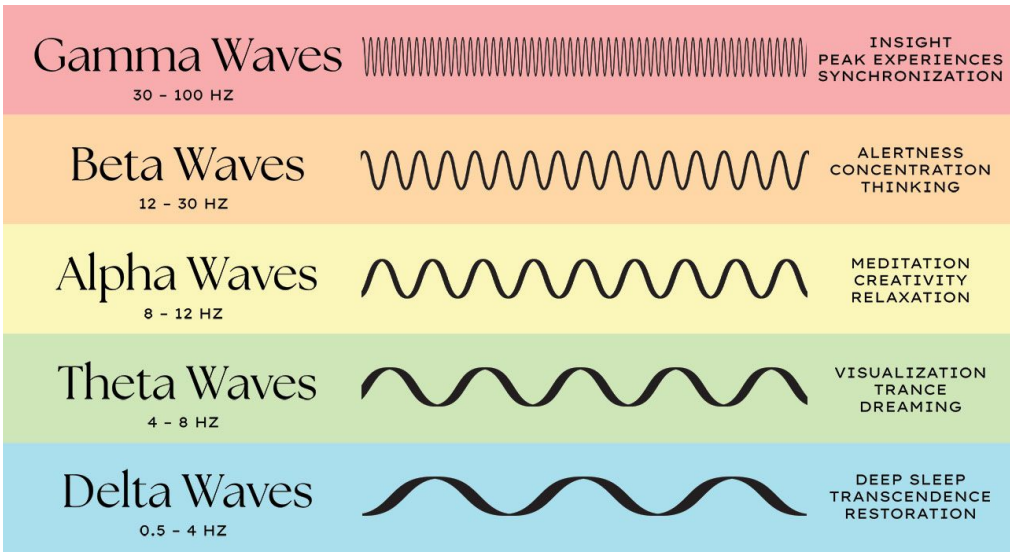
A következőkben azt próbálom meg körüljárni - a hippokampusz nevezetű ősi agykérgi terület működésének vizsgálata során tanultak alapján - hogyan történhet meg a multiplexelés, az állapotok közötti átkapcsolás egy valós idegsejthálózatban, az agyban. Ennek fontos elemei lesznek a serkentő és gátló agykérgi idegsejtkölcsönhatások, valamint, a kéreg alatti területekről származó, moduláló ingerületátvívő anyagokat (acetil-kolin, szerotonin, dopamin, etc.) felszabadító pályák. Arra is fényderül, hogy miért alakulnak ki a különböző típusú EEG jelek.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az EEG és a viselkedés összefüggése I.

Elsőként nézzük meg milyen EEG aktivitás mintázatokat lehet az agyban megfigyelni, mikor és hol fordulnak elő.

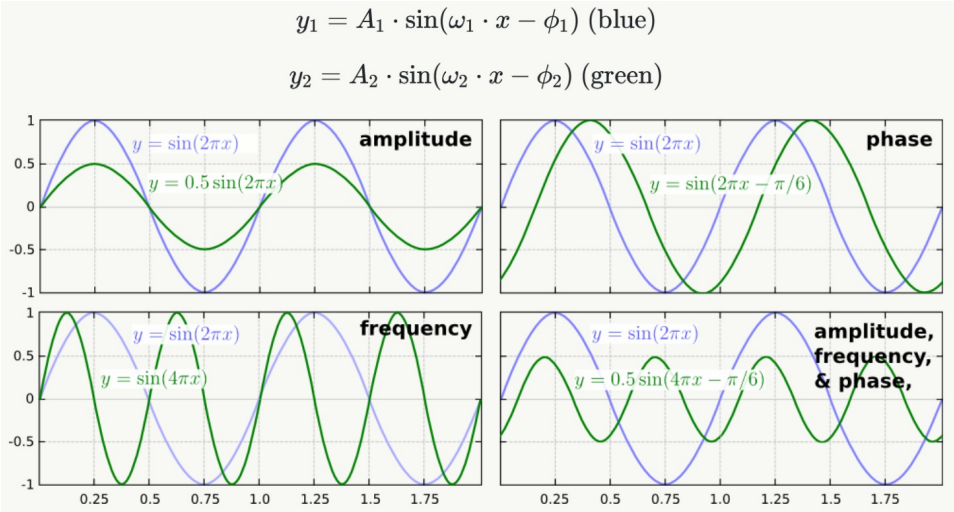
Hans Berger 1924ben írta le, hogy az agy elektromos aktivitást mutat. Ekkortájt fejlődött odáig az elektronika, hogy megfelelő erősítőkkel, az idegsejtek működésének eredményeként a koponya felszínén megjelenő igen kis feszültségeket (20-100 µV) viszonylag nagy sebességgel mérni lehessen. Az első általa megfigyelt *E*lectro*e*ncephalo*g*ráfiás, azaz EEG mintázatot alfának nevezte el.



Az agyból elvezethető szabályos EEG hullámok lajstroma és előfordulások ideje. Vannak nem periodikus EEG jelek is. Azokról a következő bejegyzésben szólunk.

A klasszikusan leírt EEG mintázatok frekvenciái az 1-30Hz-es tartományba estek és azt találták, hogy megjelenésük összefügg a megfigyelt személy vagy állat viselkedésével. Kezdetben ugye még nem voltak nagy sebességű elektromos erősítők és a hullámokat egy kormozott papírlapon ugráló lomha mágneses tű karcolta a koromba. A modern elektronika, az oszcilloszkópok, majd a számítógépek megjelenése lehetővé tette a magasabb frekvenciák vizsgálatát, illetve hogy egyszerre sok agyterületről vezethessünk el EEG jeleket. Így kiderült, hogy az EEG hullámok frekvenciái 30Hz-en túl nyúlnak, epilepszia alatt akár 400Hz-es hullámok is megjelenthetnek, illetve hogy az agy különböző részeiről frekvenciában és fázisban eltérő EEG aktivitás vezethető el, mely a viselkedéssel

(feladatmegoldás, alvás-ébrenlét) összefüggően agyterületenként változik.



Egy hullámot annak amplitudója, frekvenciája és fázisa jellemez. Ha két hullám bármalyikben eltér akkor nem egyeznek meg. Az EEG jelek elemzésénél két területről elvezetett hullám fázisa sokat mond arról milyen időzítésben kommunikálnak az agyterületek. Az ábrák fülötti egyenletekben A, omega és fi jelöli a 3 komponenst.

A fizikusok **egy hullámformát három változóval** írnak le: **frekvencia**- milyen gyorsan változik a hullám, **amplitúdó** -mekkora a hullám és **fázis** – meylik részén tartunk egy hullámnak. Ahhoz hogy két hullámot azonosnak tekintsünk mindhárom értéknek meg kell egyeznie. Ha két hullám frekvenciája és amplitudója megegyezik, de fázisa nem, akkor eltérőek. A sinus és a cosinus hullám abban tér el egymással, hogy a frekvencia egy-negydével el vannak tolva egymáshoz képest. Amikor mondjuk két agyterület gamma aktivitásáról beszélünk eltérhet ennak frekvenciája és/vagy annak fázisa. A frekvencia eltérés arra utal, hogy kicsit más sebességgel vált a sejtek aktivitása, a fázis sltérése pedig arra, hogy az egyik területen hamarabb vagy később kerülnek a sejtek ugyanabba az állapotba a másikhoz képest. Tehát ha pontosan meg akarjuk érteni mi történik, akkor nem csak a frekvenciát, hanem a fázist is figyelembe kell venni. Fizikai példa: ha két hullám ugyanolyan frekvenciájú és ugyanolyan fázisú, akkor összeadódnak, amplitudójuk növekszik. Ha a két hullám fázisa eltér egymásétól, akkor amikor az egyik maximumon van a másik lehet akár éppen minimumon is. Ilyenkor nem erősítik, hanem módosítják, akár ki is oltják egymást. Ezt interferenciának hívják No az agyban ennél azért bonyolultabbak a dolgok nem egyszerű interferenciákról van szó és itt csak a hullámok is látszólagosak, a sejtek elektromos állapotai változnak a működési módok között. De ennek ellenére a frekvenci és a fázis fontos információkat ad arról kölcsönhatásban lehetnek-e az egyes agyterületek és milyen módon.

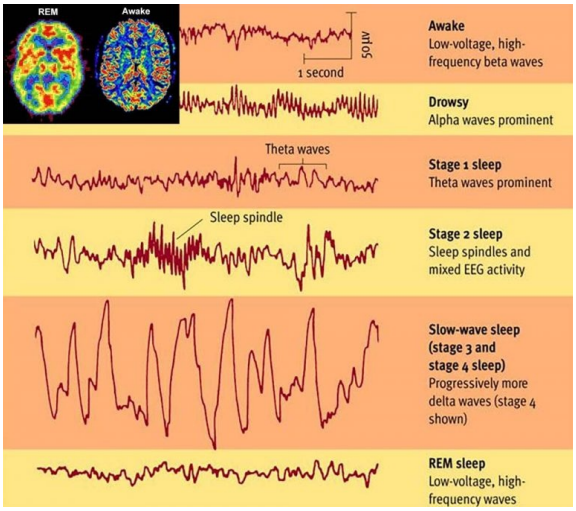
Az elsőkét leírt, 8-13 Hz közé eső alfa aktivitást nyugodt éberség (csukott szem) alatt mutatja agyunk, elsősorban a tarkó és falilebenyben, de bizonyos látást nem igénylő nehéz mentális feladatok alatt is megjelenik. Ebből azt a következtetést vonták le, hogy gátolja az éppen nem használt agyterületek működését és fontos lehet az agyterületek összehangolásában és információ áramlásában. A kéreg, a talamusz és a striátum közötti információ áramlást jelzi. Meditálás során felerősödik.

Ha egy lehunyt szemű, ellazult embert megkérünk nyissa ki a szemét, akkor a fali lebeny feletti alfa hullámokat béta váltja fel. Vélem azért látta elsőkén Berger az alfa hullámokat, mert a kezdeteknél, a bonyolult szerkezetek beállítása időigényes volt és kísérleti alanyai türelmesen vártak. Aztán amikor elkezdődtek a megfigyelések és kinyitották szemüket, hogy belevágjanak egy-egy feladat megoldásába megjelentek a másodiknak leírt (felfedezett) béta hullámok 😊

A béta hullámok (13-30 Hz) figyelmi állapotban, erős szellemi tevékenység alatt jelennek meg. Több eltérő frekvenciájú béta aktivitás létezhet egyszerre, az ezekhez társuló magasabb frekvenciájú (40-70 és 70-100 Hz) hullámokat alacsony és magas gamma aktivitásnak nevezik (ezeket Berger még nem láthatta, mivel ezeket a magas frekvenciákat lassú műszerei „lenyelték”, nem tudták érzékelni, kirajzolni). A béta és gamma aktivitást a kérgi gátlórendszer (GABA tartalmú gátlósejtek) ritmikus bekapcsolódásának tulajdonítják. A gamma hullámokról azt gondolják az agykérgi területeken megjelenő reprezentációkat kapcsolják össze, fontosak a percepcióban, a figyelemben és a tudatosság kialakulásában.

Van még. A lassúbb delta (0.5–4 Hz) és théta (4-7 Hz) hullámokat fejtetői elvezetéssel egészséges éber agyban nem lehet látni. Egészséges emberben elalvás és alvás során

jelennek meg. Álmos, szundikáló emberben théta hullámok jelennek meg, melyeket az alvás mélyülése során a lassúbb delta hullámok váltják fel. A görög betűk felhasználásában a kutatók valószínűleg akkor jutottak ide, amikor alanyaik elfáradtak és elkezdtek elszundikálni 😊. A nagy amplitúdójú delta hullámok mély alvásban jelennek meg, frontális és centrális agyterületek fölött, de az egész agyra is kiterjedhetnek. Illetve nagyon fáradt éber emberekben is megjelenhet. Miattuk kapta az alvás ezen szakasza a lassú hullámú alvás elnevezést. A kéreg-talamusz visszacsatolt hálózatban alakulnak ki. Úgy tűnik fontos a memória rögzülésében, ezen aktivitások alatt kerülnek át a memórianyomok a hippokampuszból az agykéregbe.



Az alvás egyes fázisaihoz társuló EEG hullámok. Elálmosodás, elalvás és alvás alatt az EEG aktivitás lassul.

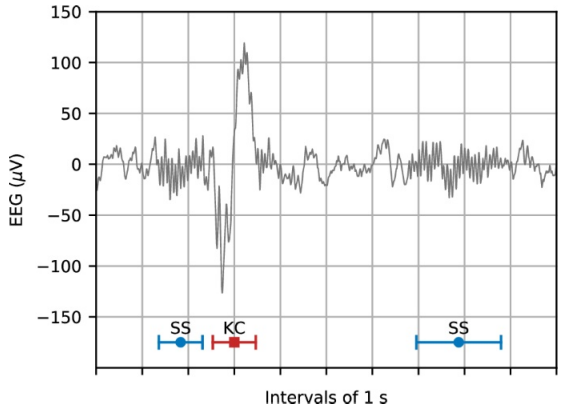
A théta hullámoknak előbukkanhatnak még a homloklebeny területén figyelmi feladatokban vagy meditálás alatt. Egy másik típusuk a hippokampuszban figyelhető meg miközben az állat felderíti környezetét, aktív mozgást végez. A különböző helyeken keletkező théta hullámok keletkezési mechanizmusa és funkciója más, mindössze az az azonosság, hogy hasonló gyakorisággal váltanak állapotot az agyi területek.

A következő bejegyzésben folytatjuk a magatartás és az EEG hullámok közötti összefüggések bemutatását.

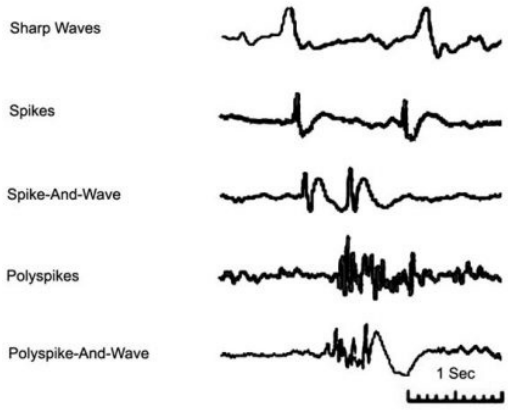
Szerző: **Gulyás Attila**

Az EEG és a viselkedés összefüggése II.

Az előző bejegyzésben a szabályos EEG mintázatok ismertetésével fejeztük be. Az EEG-ben megfigyelhetők nem szabályos jelalakok is, mint például a delta hullámok mellett megjelenő K komplexek, illetve a hippokampuszból elvezethető éles-hullámok, vagy az epilepsziás rohamok során megfigyelhető tüskék.



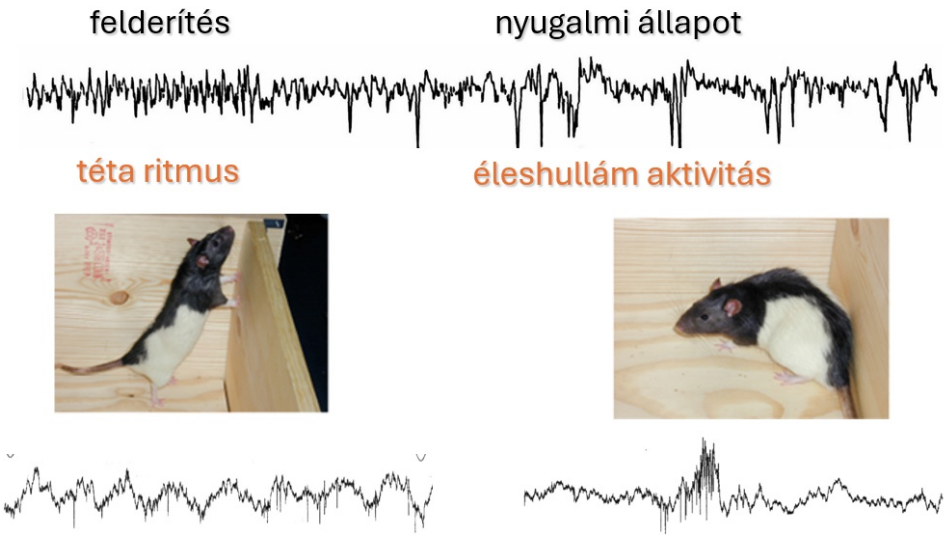
Alvás alatt megjelenő, nem periodikus K-komplexek (piros vonal) és a környezetükben rövid időre megjelenő alvási orsók (piros vonalak).



Különböző alakú rövid epilepsziás kisülések. Az idegsejtek rövid ideig tartó erős, összehangolt kisülését jelzik.

Ezek szabálytalan időközönként megjelenő, rövid elektromos jelformák. A szabályos hullámokhoz hasonlóan az agy egy-egy információ feldolgozó állapotát jelzik. *Pontosítva, az epilepsziás kisülések során a sejtek nagy része aktiválódik, így az agy nem tud értelmes mintázatokat hordozni, azaz információt sem tud feldolgozni.*

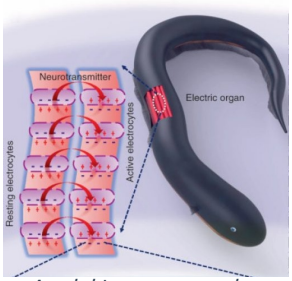
Az EEG aktivitás és a magatartás közötti összefüggés egyik jól ismert és alaposan kutatott példája, hogy amíg egy állat felderíti környezetét addig szabályos hulámformájú théta oszcillációt lehet megfigyelni a hippokampusában, de amikor valami fontos dolog történik, pl. megijesztik vagy valami kellemes élmény éri, akkor az EEG-je kisimul és szabálytalan időközökben nagy amplitúdójú rövid éles-hullám-fodor aktivitás jelenik meg. Erről az átmanetről hamarosan sokat beszélek majd.



Miközben a patkány felderíti környezetét, hippokampuszából periodikus theta aktivitás vezethető el. Amikor valamilyen fontos inger (jó vagy rossz) éri, hippokampuszában a lecsendesedő EEG alapon rövid ideig tartó éles-hullám-fodor kisülések jelennek meg.

A felfedezésük óta eltelt 100 évben sikerült sok mindent megérteni az EEG hullámokról. Messze állunk még attól hogy tudjuk melyik mit jelent, mi a szerepük és funkciójuk, de azt már kapizsgáljuk honnan erednek. Az idegsejtek ugye elektromos jeleket használnak. Egy akciós potenciál 80 mV amplitúdójú, egy szinaptikus potenciál 1-3 mV. Miért van akkor mégis, hogy a koponyára helyezett elektródákkal csak néhány 10 μV-os potenciálokat, ennek tízezredét tudjuk mérni? Azért, mert egy idegsejt felszínén több ezer pozitív és negatív

áramocska folyik minden pillanatban, melyek összekeverednek több tízezer ugyanott elhelyezkedő idegsejt pillanatonként változó áramaival, és az esetek nagy részében kioltják egymást. Úgy mint amikor bedobunk a hangyák közé egy kenyérmorzsát és azok véletlenül minden irányból elkezdik azt cibálni, a morzsa nemigen mozdul el, mert bár egyetlen hangya el tudná vinni, ha mindannyin cibálják az ellentétes irányú erők kioltják egymást. Értékelhető EEG jelet csak abban az esetben kapunk, ha van valamilyen összhang az áramok között, illetve ha az idegsejtek szabályosan, egymás mellé rendezetten helyezkednek el .



Az elektromos angolna elektromos szervében módosult izomsejtek találhatók, melyek rendezetten helyezkednek el. Az izomsejtek az idegsejtekhez hasonló elektromos jeleket hoznak létre, de ellentétben az aggyal ahol a sejtek nyúlványrendszere összefonódik és az áramok lerontják egymást, az angolna elektrocitáinak elektromos tere összeadódik.

Történesen szabályosan rendezett elektromos sejtek hatalmas feszültségeket képesek előállítani. Az elektromos angolnák és harcsák akár egy lovat is leterítő áramütéseiket módosított izomkötegeikkel állítják elő, amelyekben az idegsejtekhez hasonló, 80-100mV-os membránpotenciállal rendelkező izomsejtek rendezett és irányított sorokban helyezkednek el. Ennek hatására feszültségük összeadódik. Az agyban ez nem így van, a rendezetlenség miatt a jelek nem erősítik, hanem lerontják egymást.

Azonban ha még így keletkezne is valami nem teljesen kioltott jel, annak még át kell jutnia a magas ellenállású lágy és keményagyhártyán, a koponyacsonton és a fejbőrön.

Ezért EEG-vel kb. annyi információt nyerhetünk az agyi idegsejtek elektromos aktivitásából, mintha egy focistadionból kiszűrődő morajlás alapján próbálnánk megérteni miről beszélgetnek az egyes szurkolók. Amíg a lelátón ülünk a szurkolók között, hallhatjuk azok mit mondanak. De ha lemegyünk szotyit venni a büfébe vagy kimegyünk a stadion elé, az egyedi emberek hangja elmosódik és csak azt fogjuk hallani, amikor felhördül a tömeg, mert pl. felrúgtak valakit vagy gól van. Csak az erősen egyidejű, szinkron, korrelált (összefüggő) hangok erősítik egymást, az egyes beszélgetések kioltják.

Az EEG tehát nem tudja megmondani pontosan milyen információfeldolgozás történik az agyban, csak azt, hogy mikor melyik helyen és milyen ritmusban működnek együtt az idegsejtek.

A következő bejegyzésekben saját kutatásaimat bemutatva írok arról, hogyan lehet megfejteni az EEG hullámok kialakulását és hogy mit jelenthetnek?

Szerző: **Gulyás Attila**

A tengericsikó meséje I: A hippokampusz kapcsolatrendszere és működési módjai

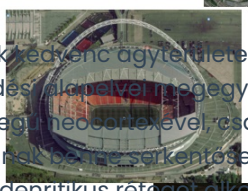
Hogy kerül ide a tengericsikó? Hát úgy, hogy az agykéreg legősibb, legegyszerűbb szerkezetű része keresztmetszetben egy olyan dupla kanyart alkot, ami a régi anatómusokat a tengericsikóra emlékeztette, ezért annak latin neve után hippokampusznak nevezték el.

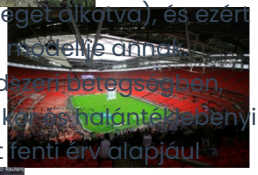


Az emberi hippokampusz dupla kanyarulatával (bal) a tengericsikóra (latinul hippocampus) emlékeztette az anatómusokat.

Az agykutatók kedvenc agyterülete. Egyrészt, mert bár szerveződési alapelvében megegyeznek a modern 6 rétegű neocortexével, csak egy rétegben vannak benne serkentő sejtek (3, helyenként 4 dendritikus réteget alkotva), és ezért egy remek egyszerűsített modellje annak. Másrészt, számos idegrendszeri betegségben, mint például az Alzheimer kór, és halántéklebenyi epilepsziában érintett. Mindkét fenti érv alapjául szolgáltatnak, hogy kutatásaim során miért a hippokampusszal foglalkozom. A vizsgálódásaimat vezető kérdésem az volt, hogy:







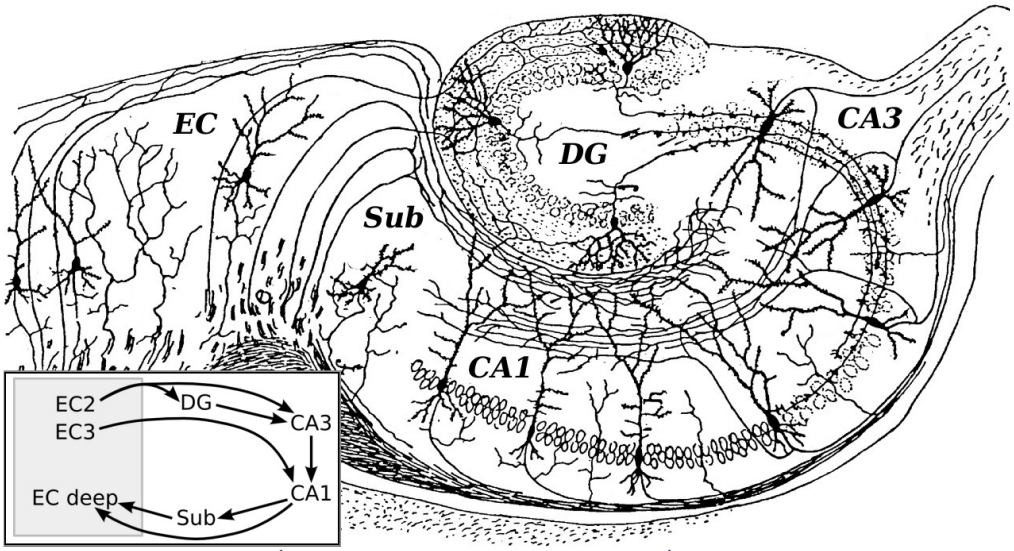


egyre kevesebből egyre többet tudunk meg

"A serkentő és gátlósejtek kölcsönhatásából hogyan alakulnak ki a hippokampuszban megfigyelhető aktivitás mintázatok?"

Ahogy távolodunk az egyedi jelek forrásától, úgy egyre inkább csak az átlag zajt halljuk. A stadionban a lelkes hallják mint mond egy-egy ember, de összességében kívülről csak a normalizált, a sok egymástól független (egymás ellen is dolgozó) aktivitás összességének legyengült átlagát mutatja.

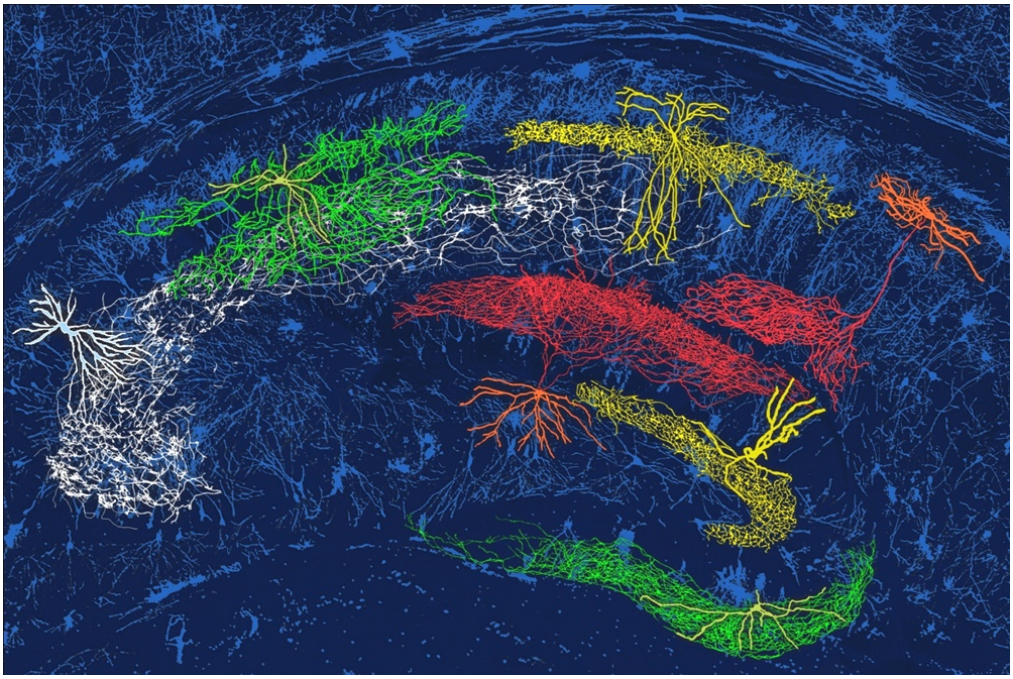
Először anatómusként azt vizsgáltam, milyen gátlósejt típusok találhatók a hippokampuszban, ezek milyen szabályok szerint kapcsolódnak a hálózatba, majd élettanászként azt, hogy ezek hogyan befolyásolják a serkentősejtek működését, valamint a serkentő-gátló kölcsönhatások, hogyan vezetnek az egyes (eltérő magatartási állapotokban eltérő feladatokat megoldó) aktivitásmintázatok kialakulásához.



Santiago Ramon y Cajal (a neuroanatómia egyik megalapítója) Golgi festett metszetek alapján készített tusrajza, mely a hippokampusz területeit és kapcsolatrendszereit mutatja be. A gyrus dentatus (DG) szemcsesejtjei az entorhinális kéregből (EC) kapnak bemeneteket, melyeket a CA3 terület piramissejtjeire küldenek tovább. Ezek a sejtek Schaffer-kollaterálisaik útján továbbítják az információt a CA1 terület piramissejtjei felé, akik ezt integrálják az EC-ből érkező közvetlen bemenet információjával. A bal alsó sarokban a triszinaptikusos, három-szinapszisos kéreg-hippokampusz-kéreg kör kapcsolatai láthatók. Fontos! Se a rajz, se az ábra nem hangsúlyozza a CA3 terület piramissejtjei között megfigyelt igen erős serkentő visszacsatolást. Ennek fontos szerepe van a hippokampusz aktivitásmintáinak kialakulásában.

A hippokampusznak, durván, 3 alterülete van, melyek egymásnak továbbítják az

információt: a gyrus dentatus nevű részébe érkeznek be, elsődlegesen az entorhinális kéregen keresztül, az egyes érző agykérgek felől a magasan feldolgozott jelek. Ezek itt a szemcsesejteken végződnek, melyek aztán az információt továbbküldik a CA3-al jelölt terület piramissejtjei felé, akik feldolgozás után az információt tovább pattintják a CA1 terület piramissejtjeinek, akik végül a hippokampusz kimenetét adják. Ezt hívják tri-szinaptikus huroknak, három-szinapszisos körnek, hiszen a kéregből érkező információ 3 hippokampális átkapcsolás után, feldolgozva visszakerül a kéregbe.
A szemcse és piramissejtek serkentősejtek, kapcsolataik a Hebb szabály szerint módosulnak, tanulnak. Ez idáig egy egyszerű 3 rétegű előrecsatolt hálózat lenne, de a dolog ennél bonyolultabb. Egyrészt mind a CA3 mind a CA1 sejtek közvetlenül is kapnak bemenetet az entorhinális kéreg felől, távoli denrtiágaikra, így a közvetlen és már előfeldolgozott érző információkat integrálják. Másrészt, a CA3 terület sajátossága, hogy serkentő sejtjei között az agykéregben egyedülállóan erős kölcsönös kapcsolat, visszacsatolás figyelhető meg. Ez lehetővé tesz bizonyos fajta visszacsatolt feldolgozást, de sajnos ezáltal a hippokampuszt hajlamossá teszi az aktivitás túlgerjedésére. Nem véletlen hogy a temporális (halánték) lebenyből ered az epilepsziák jelentős része. Ennek elkerülésére, mint az agykéreg más részein is, a serkentősejtek közé 10-15% gátló sejt keveredik. Fentebb részleteztük, hogy ezek egy része, a sejttesten végződő gátlósejtek (kosár és axo-axonikus sejtek), a sejek tüzelési küszöbének szabályozásában, illetve a sejek működésének összehangolásában fontosak. Másik részük, a dendritekre érkező számos gátlósejttípus, pedig a dendritikus jelek integrációjában, az eltérő bemenetek súlyozásában és a szinaptikus plaszticitás (tanulás) hatékonyságának szabályozásában fontos.



Gátlósejtek a patkány hippokampuszának 3 területén. A sejtek dendritjeit vastag, axonjait vékony vonalak jelölik. A serkentősejtek kimenetét leghatékonyabban befolyásoló gátlósejtek (kosársejtek, mivel kosárszerűen körbefonják a serkentő sejtek sejttetét) nyúlványrendszere sárga. A különböző denritiken végződő gátlósejteké piros (a távoli dendritágakra érkező bemeneteket ellenőrzik), fehér (a CA3 rekurrens kollaterálisok és a Schaffer kollaterálisok bemeneti területét ellenőrző gátlás) és zöld (a közei dendritágakra ható gátlás, vélhetőleg a tanulásban fontos kalcium áramokat és ezáltal a tanulást befolyásolja).

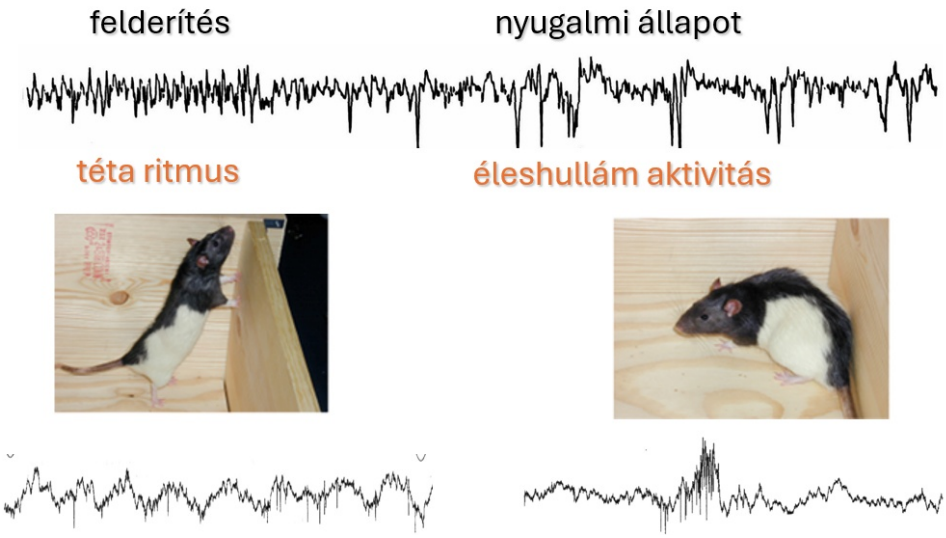
Azt hogy melyik gátlósejt mikor és hogyan működik, nem csak a bemenetek és a serentő sejtaktivitás erőssége, hanem a kéreg alatti területekről érkező moduláló bemenetek is szabályozzák. Ezek a bemenetek azáltal befolyásolják igen hatékonyan a hálózatok feldolgozási módját, hogy a több ezer serkentősejtet ellenőrző gátlósejt csoportok működését hangolják.



Néhány jól elhelyezett sebességmérő rendőr az autósok nagy csoportjának viselkedését tudja meghatározni. Az agykérgi idegsejtek 10%-át kitevő gátlósejtek szabályozásval a kéreg alatti bemenetek nagy serkentősejt populációk aktivitását tudják hangolni.

Egy szemléltető párhuzam erre, a forgalmi rendőrök munkája. Alapesetben figyelnek a gyorshajtókra, ellenőrzik a forgalmi engedélyt és hogy van-e nálunk láthatóság mellény. Alkalmanként, például húsvétkor, azt mondja a főnökük (kéreg alatti terület), hogy most aztán igen alaposan figyeljenek az ittas vezetőkre (serkentősejtek), tartsan rendszeres szondás ellenőrzést. Ezzel aztán sok autós viselkedését tudják befolyásolni. Máskor, mondjuk egy biztonságnövelő kampány keretében, ellenőrzik a láthatósági mellények használatát, vagy fokozottan mérik a sebességet az iskolák környékén. Egy központi utasítás hatására viszonylagkevés rendőr a sok autós viselkedését hatékonyan tudja módosítani.

Egy korábbi fejezetben ismertettem, hogy a hippokampusz fontos a hosszútávú memória kialakításában. Éber állatban alapvetően két EEG mintázatot lehet elvezetni annak hippokampuszából. A felderítő, mozgó, bogarászó állatban theta aktivitás figyelhető meg, melyeket bizonyos fázisaiban gamma hullámok díszítenek. A theta (felderítés) alatt két állapot váltogatja egymást, hogy a hippokampusz két feladatot tudjon megoldani egyszerre. Egyrészt az állat a korábban tanultak alapján előhívja, hogy merre is kellene menni (előhívás, számítás), másrészt elraktározza a rövidtávú memóriában, hogy épp merre halad az állat (tárolás).



Miközben a patkány felderíti környezetét, hippokampuszából periodikus theta aktivitás vezethető el. Amikor valamilyen fontos inger (jó vagy rossz) éri, hippokampuszában a lecsendesedő EEG alapon rövid ideig tartó éles-hullám-fodor kisülések jelennek meg.

Amikor az állatot valami fontos inger éri, a mediális szeptum nevezetű területről induló moduláló pálya működése megváltozik, melynek hatására a hippokampusz aktivitása átkapcsol és a theta hullámokat éles-hullám-fodor aktivitás (sharp-wave ripple, SWR) váltja fel. Ezek szabálytalan időközönként megjelenő gyors, összehangolt sejtkisülésekből erednek, mely kisülések alatt a sejtek magas frekvencián (160Hz) együtt sülnek ki (ezek és a szinkronitást okozó gátlás okozza a fodor (ripple)) aktivitást az EEGben. Az éles hullámok alatt időben tömörítve visszajátszódnak azok a serkentő sejt aktivitás mintázatok, amik a megelőző theta ciklusok alatt megtörténtek. A közelmúlt rövidtávú memóriája összeáll egy eseménysorozattá, és visszajátszódik, hogy bekerüljön a hosszútávó memóriába. Lásd: autó

biztonsági kamerája ami folyamatosan felveszi az úton történteket, hogy azokat szükség esetén elmenthessük és visszajátszhassuk.

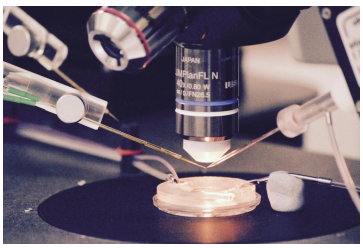
No de felmerül a kérdés, hogy: Hogyan tud ugyanaz a hippokampáis idegsejthálózat több különböző aktivitásmintázatot előállítani?

Szerző: **Gulyás Attila**

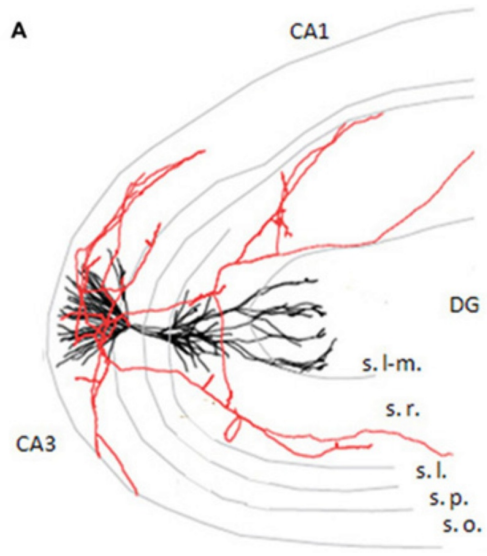
A tengericsikó meséje II: A gamma és az éleshullám aktivitás keletkezése

Ezzel a kérdéssel fejeztük be: "Hogyan tud ugyanaz a hippokampáis idegsejthálózat több különböző aktivitásmintázatot előállítani?"
Ezt a kérdést vizsgáltuk majd egy évtizedig. Megválaszolásához az in vitro agyszelet technikát használtuk. A hippokampuszból 600 µm (0.6mm) vastag agyszeleteket lehet készítni, melyekben több tízezer sejt őrzi meg kapcsolatrendszerét, és megfelelő körülmények biztosítása esetén működését.

Az ilyen szeletek lehetővé teszik, hogy mikroszkóp alatt 1-2 vagy 3 elektródával elvezessük egyrészt a hálózat csoportos (populációs) aktivitását mutató EEG jeleket, másrészt egyedi idegsejtek aktivitását. Hájos Norbert kollegám kidolgozott egy olyan szeletfenntartó kamrát, amelyben a kis hippokampusz darabok, a fenntartó oldathoz adagolt kéreg alatti átvivő anyag analóg (charbachol, mely az acetil-kolin hatását utánozza) jelenlétében gamma aktivitást, annak hiányában SWR-ket állítottak elő. Megvolt tehát egy modell rendszerünk arra, hogy azt vizsgáljuk, hogyan áll elő a hippokampusz serkentő és gátló sejtjeinek kölcsönhatásából a két aktivitásmintázat.



Agyszelet fenntaró kamra mikroszkóp alatt. Jobbról és balról két üvegelektród közelíti meg a szeletet, melyekkel mezőpotenciált és egy sejt aktivitást lehet elvezetni.

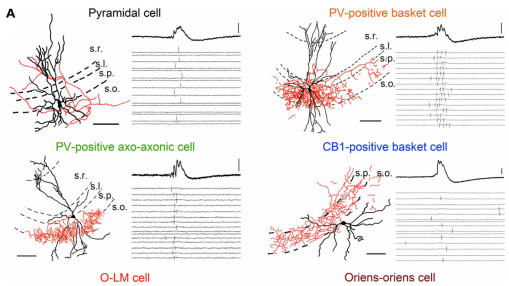


Egy festékanyaggal feltöltött és rekonstruált CA3 piramis sejt (serkentő sejt) elágazás rendszerének részlete (mivel szeletben töltötték az elágazásrendszer jelentős része elveszett). A pirossal jelölt axonok dúsan elágaznak a CA3 területen belül, mielőtt átlépnek a CA1 területre. A helyi axonágak miatt erős, visszacsatolt

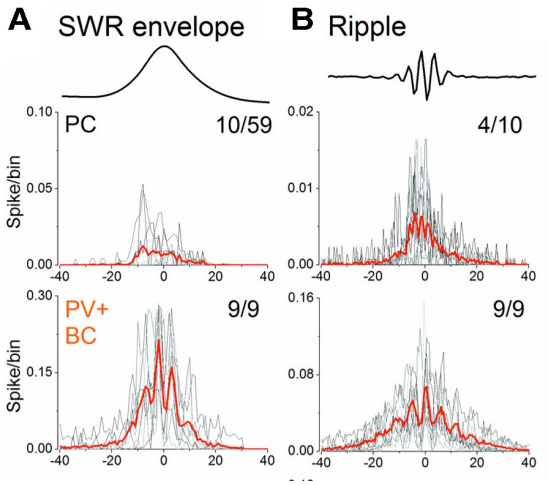
Hogy a részleteket bemutathassuk, el kell merülnünk egy kicsit a CA3 terület anatómiájában, ugyanis itt dolgoztunk, mert élő állatokból származó EEG kísérletek alapján, ez a terület a kiindulópontja mind a gamma, mind az éleshullám aktivitásnak. Mint írtuk, ennek a területnek a jellemzője az, hogy két tetszőleges serkentő sejtje viszonylag nagy valószínűséggel van összekötve, azaz a CA3 hálózat erősen visszacsatolt, rekurrens. Míg ez a valószínűség a hippokampusz CA1 rétegében 0.1%, azaz 1:1000, addig ez a CA3-ban 2-3%, azaz 1:30-1:50. Ezenkívül hasonlóan erős kapcsolat található a serkentő sejtekről a gátlósejtek felé. Ennél még erősebb a gátlósejtekről a serkentő sejtekre érkező gátlás. Ennak valószínűsége 100%, azaz egy gátlósejt a környezetében található összes serkentő sejtet beidegzi. Ráadásul korábbi munkáink alapján többszörös kapcsolattal. Igaz ez a sejttesten

kapcsolatrendszer alakul ki a CA3 terület serkentő sejtjei között.

végződő kosársejtekre és a dendriteken végződő sejtekre is. A CA3 tehát tartalmaz egy erősen visszacsatolt serkentő hálózatot, melyet szerencsére egy igen hatékonyan csatolt gátlórendszer tart ellenőrzése alatt.



Eltérő sejttípusok aktivitása éles-hullám-fodor (SWR) alatt. Több sejttípus tüzelését vizsgáltuk meg, miközben elvezettük a SWR aktivitást az agyszeletekből. A bal felső egy CA serkentő sejt, egy piramissejt. A többi sejt eltérő típusú gátlósejt, melyek közül a PV tartalmú kosársejtek bizonyultak a legfontosabbnak a SWR kialakításban. Mindegyik panelen bal oldalt látható az azonosított sejtek rajza. Jobbra fent egy átlagos SWR, azaza a hálózat populációs aktivitása. Alatta számos SWR alatt a sejt akciós potenciáljai.



A sejtek tüzelésének időzítése a SWR burkolójához (bal) és a fodor (ripple) oszcillációhoz (jobb) képest. Csak a piramis sejtek (PC) és a parvalbumin kosársejek (PV) eredményeit mutatjuk. A PV sejtek jelentősen többet és pontosabban tüzeltek, ők adják a ritmust amihez a PC-k igazodnak.

Hogyan is álltunk neki? Először is megnéztük azt, hogy a CA3 serkentő piramissejtjei és számos eltérő gátlósejt csoportja a háttér (gamma és SWR) aktivitás mely fázisaiban tüzel. Ehhez sok száz szelet sok száz anatómiailag azonosított sejtjéből kellett jeleket elvezetni, és összehasonlítani a hálózat EEG aktivitásával, mind gamma ,mind SWR aktivitás alatt. Ebből megtudtuk azt, hogy az eltérő sejtek időben hogyan aktiválódnak, ki-ki előtt és után tüzel, azaz a serkentősejtek milyen gátlósejteket serkentenek és milyen gátlósejtek mikor fejtik ki gátlásukat, mely a serkentősejtek jelintegrációját befolyásolja.

Kicsit olyan mint a szociológus munkája, aki mondjuk a metró bejáratánál ül és különböző napszakokban megkérdezi az arrajárókat, hogy mi a munkájuk. Kora hajnalban pékeket és buszvezetőket fog fogni, akik munkájukba igyekeznek. Reggel van a legnagyobb forgalom, ilyenkor járnak a nappali műszakosok munkába. Délelőtt nyugi van, de a délutáni csúcsba a hazatérők mellé keverednek az esti műszakosok, portások, biztonsági őrök, takarítók. És így tovább. Ebből aztán ha még nem értené, összerakhatná, hogy a munkát a pékek és buszvezetők indítják és az éjjeli őrök meg takarítók zárják, a többiek középen szorgoskodnak.

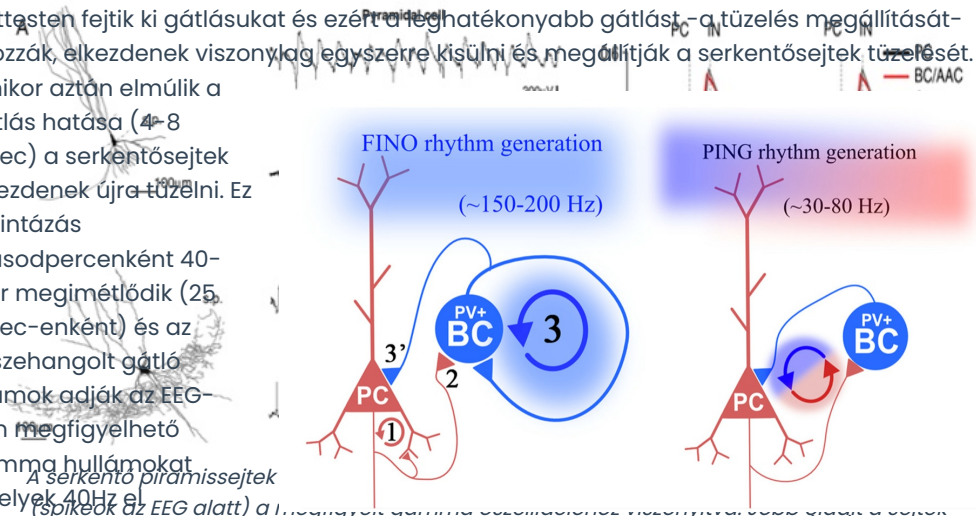


Ha sok embert egyenként megkérdezünk szokásairól, következtetéseket tudunk levoni a társadalom működéséről is.

Mit tudtunk meg mindebből? A gamma és az SWR alatt más a sejtek kölcsönhatása, máshogy működnek ugyanazok a sejttípusok, pedig összeköttetés-hálózatuk szerkezete nem változik meg .

A gamma aktivitás ciklusa azzal kezdődik, hogy a serkentősejtek elkezdenek tüzelni. Amikor

aktivitásuk elér egy bizonyos szintet, a parvalbumin (PV) tartalmú kosársejtek, melyek a sejttesten fejtik ki gátlásukat és ezért a leghatékonyabb gátlást -a tüzelés megállítását- okozzák, elkezdenek viszonylag egyszerre kisülni és megállítják a serkentősejtek tüzelését. Amikor aztán elmúlik a gátlás hatása (4-8 msec) a serkentősejtek elkezdenek újra tüzelni. Ez a hintázás másodpercenként 40-szer megimétlődik (25 msec-enként) és az összehangolt gátló áramok adják az EEG-ben megfigyelhető gamma hullámokat (melyek 40Hz el érkeznek). SWR-k alatt egészen más történik (hogy miért arról hamárosan). Ilyenkor az agyszeletek átlagban jelentősen csendesebbek, mint gamma aktivitás alatt. Néha 1-2 másodpercig néhány pirami sejt kivételével alig szólal meg valaki. Aztán egyszercsak, körülbelül 1/10-ed másodperc alatt, a serkentősejtek aktivitása elkezd meredeken nőni, egyenlőre még nem egymáshoz rendezve. Ez eredményezi az éles hullám lassú burkoló görbéjét. Amikor aztán a serkentő hálózatban az aktivitás elér egy küszöböt (mint a gammánál), a PV tartalmú kosársejtek elkezdenek kisülni, de ilyenkor a gyorsan felépülő erős serkentés miatt egymáshoz hangoltan, nagy frekvenciával ismételten sülnek ki. Ez az összehangolt gátlás a serkentősejteket is összehangolt kisülésre készteti. A két sejttípus kisülése és a gyors gátló áramok adják az éleshullám csúcsán a 160Hz-es fodor (ripple) oszcillációt. 4-8 összehangolt kisülés után aztán a serkentősejtek kifáradnak, az SWR elhal, és hosszú ideig csend honol a szeletben, mindaddig míg a kipihent serkentősejtek egy újabb serkentő sejt kisülés lavinát, újabb SWR-t indítanak el.



A serkentő piramissejtek (spikeok az EEG alatt) a megfigyelt gamma oszcillációhoz viszonyítva jobb alatt a sejtek aktivitásának időzítés eloszlása látható a gamma oszcillációhoz képest (LFP-vel jelölt, pontvonal). A vastag tekete vonallal jelölt, alacsony frekvenciával tüzelő serkentő sejtek (PC) korábban tüzelnek, mint a piros vonallal jelölt kosár és axo-axonikus sejek (BC/AAC), melyek hatékony gátlásukkal elhallgattatják a serkentő sejteket. A ciklus kisvártatva újra indul, másodpercenként 40-szer.

Az aktivitás fejlődését bemutató diagramok SWR (bal) és gamma (jobb) alatt. A FINO (fast-interneuron-oscillation) modell szerint először a serkentő sejtek rekurrens kapcsolatrendszerében kezd felépülni a serentő aktivitás (1). Amikor ez kellően erős lesz, elkezdi serkenteni a gátlósejteket (2), akik kölcsönös gátlásuk miatt egy nagyfrekvenciájú oszcilláló gátlást adnak egymásra és a serkentő sejtekre (3 és 3'). Egy idő után a serkentő sejtek elhallgatnak és az aktivitás elhal. A PING (piramidal-interneuron gamma) modell szerint gamma alatt az aktiválódó piramissejtek beindítják a gátósejteket, akik elhallgattatják őket. A gátlás elmúltával a serkentő sejtek újra megszólalnak.

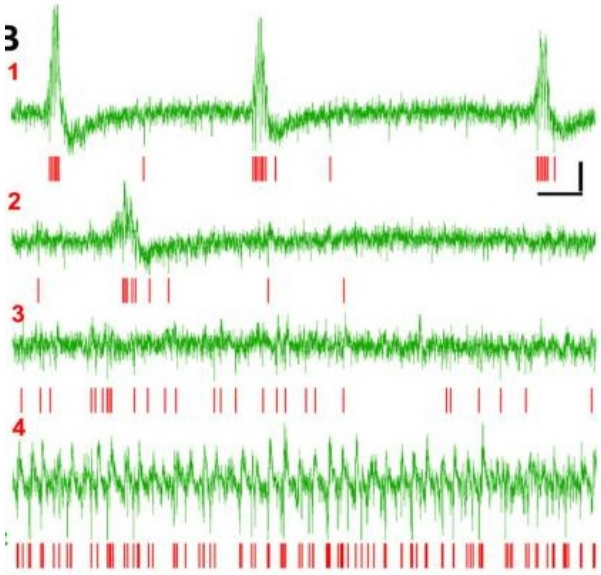
Szerző: **Gulyás Attila**

A tengericsikó meséje III: A sejtek és a szinaptikus átvitel tulajdonságainak hangolása vált a hálózati működési módok között

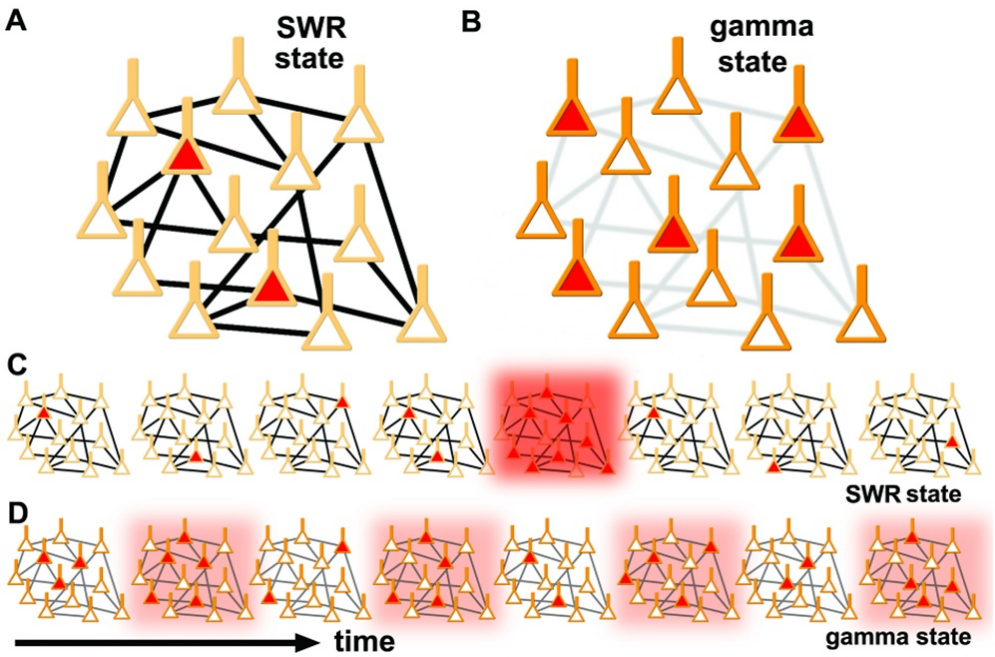
Idáig eljutottunk oda, hogy megmutattuk a két állapotban milyen időzítésben történnek a dolgok egymás után, de azt hogy miért, azt még nem értettük. Ugye hálózatot vizsgálunk, a hálózatoknak pedig vannak csomópontjai és élei, sejtjei és szinapszisai.

A váltás megértéséhez meg kellett vizsgálnunk, milyen hatása van az aktivitás átkapcsolást okozó charbacolnak (az acetil-kolin hatását utánzó hatóanyagnak) a serkentő és gátlósejtek tulajdonságaira (csomópontok), illetve szinaptikus kapcsolataik erősségére (élek). Ugye egy hálózatnak vannak anatómiai és élettani tulajdonságai. Az összeköttetés-rendszer (anatómia) adott, de azt hogy milyen erősen hatnak kölcsön a sejtek és hogyan összegzik bemenetüket (élettan) az könnyen változhat.

Alaphelyzetben (kolinerg hatás nélkül) a hippokampusz CA3 serkentő sejtjeinek ingerelhetősége alacsony, ritkán szólalnak meg. Ugyanakkor a sejtek közötti serkentő és gátló szinapszisok hatékonysága magas, azaz ha egy sejt kisül, ingerülete hatékonyan terjed tovább vagy a gátlás hatékonyan csendesíti. Amikor a szeletekhez carbachol-t adtunk, azt tapasztaltuk, hogy annak kettős hatása van. Egyrészt, hatására mind a serkentő mind a gátlósejtek depolarizálódnak, membránpotenciáljuk pozitívabb lesz, azaz serkenthetőbbé válnak, könnyebben szólalnak meg. Másrészt carbachol hatására jelentősen csökken a serkentő és kisebb mértékben a gátló szinaptikus potenciálok mérete, azaz csökken a sejtek egymás közötti jelátadásának hatékonysága.



Az agyszelet állapotváltását bemutató ábra. Egy 20 perces kísérlet eltérő fázisaiból mutatunk be 2 másodperces szakaszokat. A zöld vonal mutatja a mezőpotenciált (helyi EEG), azaz ahálózat működését, a piros vonalak pedig, hogy egy serkentő sejt mikor tüzel minezek alatt. Az 1-es időpontban látszik, hogy a sejtek nem szólalnak meg az SWR-ek között, de alattuk erősen. A carbachol szeltre mosásával az SWR-ek eltűnnek, de az átlag sejtaktivitás elkezd megnőni (2-3). A kialakult gamma oszcilláció alatt (4) a sejtek gyakran aktívak, de egy-egy gamma ciklus rövid és az aktivitás nem nő olyan magasra, mint az SWR-ek csúcsán..



A bal felső ábra a CA3 hálózatot mutatja alacsony kolinerg tónus mellett. Ilyenkor a sejtek serkenthetősége alacsony (világos narancs sejtek), melynek hatására egyszerre viszonylag kevés sejt aktiválódik. Viszont, ahogy a vastag fekete összeköttetések jelzik, a sejtek hatékonyan kommunikálnak. A jobboldalon a hálózat tulajdonságai látszanak acetil kolin jelenlétében. Ilyenkor a sejtek könnyen aktiválódnak (erős narancs körvonalak) aminek hatására sok sejt aktiválódhat

egyszerre. De ugyanekkor a sejtek közötti kapcsolatok erőssége csökken (szürke vonalak). A C panel azt mutatja, hogy SWR állaotban ugyan ritkán aktiválódik a hálózat, de mivel erősek a kapcsolatok az aktivitás magas szintre gerjed. A D panel a gamma aktivitás alatti dinamikát mutatja. Ilyenkor a sejtek gyakran beindítják a hálózatot, vuszont az aktivitás lassan épül fel és a felépülő gátlás leállítja, mielőtt magas szintre jutna.

De miért viselkedik ezek miatt a hálózat két különböző módon?

SWR állapotban (alacsony kolinerg tónus) a sejtek lusták, ritkán szólnak, viszont hatékonyan tudnak egyással kommunikálni. Gamma állapotban (magas kolinerg tónus) a sejtek izgágák, beszédesek, de rosszul kommunikálnak egymással. A hippokampusz CA3 területére ugye jellemző, hogy a sejtek között erős a visszacsatolás, egymás serkentése. Ez a kapcsolat fontos az aktivitás kialakulásában.
SWR állapotban idönként megszólal egy-egy serkentő sejt, de mivel erősen össze vannak kapcsolva, ha egy kritikus időablakon belül elegendő sejt szólal meg (akár véletlenszerűen), akkor elkezdik egymást serkenteni, és a hatékonyan kapcsolt hálózatban megindul a serkentő aktivitás felépülése, megindul egy aktivitás lavina. Mivel a sejtek lusták, ritkán indul be egy lavina. De ugyanakkor a kapcsolatok erősek, ha egyszer beindult egy lavina sokáig és nagyra fejlődik, sok sejt lesz aktív. Ezért van az hogy az SWRek ritkán és szabálytalanul jelennek meg, de magas és hosszú ideig tartó sejtaktivációval járnak.
A magas kolinerg tónusú Gamma állapotban a sejtek izgágák, könnyen tüzelnek, de a kommunikációjuk gyengécske. Az izgágaság miatt a hálózatban gyakran indul meg az aktivitás felépülése, de mivel a kommunikáció nem jó az elinduló gyakori lavinák csak rövid ideig tartanak és viszonylag kevés sejt vesz bennük részt, mielőtt a gátlás megállítja őket (aztán az izgágaság újraindul).



A filozófusok ritkán szólnak, de akkor alaposan megbeszélnek egy témát.

A két aktivitás alakulása hasonlítható ahhoz, mint amikor egy teremben komoly szótlan filozófusok beszélgetnek valamiről, vagy egy csapat óvodás civakodik. A filozófusok ritkán szólnak, de alkalmanként felmerül egy téma, ami aztán hatékonyan terjed és hosszan tartó, mindnekit magával ragadó beszélgetésbe torkollik. A csacsogó óvodások közt ezzel szemben gyakran tör ki civakodás, de ez nem terjed hatékonyan, hamar elhal, azonban hamarosan egy másik kezdődik.

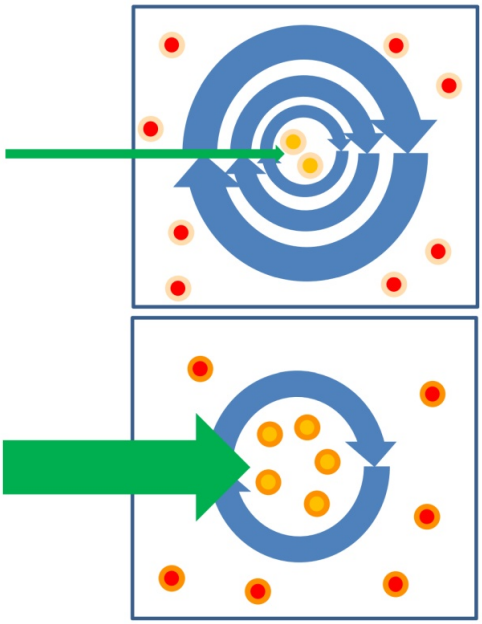


Egy gyerekcsapatban gyakran és gyorsan változnak a témák.

Most már látjuk, hogy a sejt és hálózati paraméterek hangolása hogyan okozhat eltérő hálózat aktivitási mintázatokat. De mire jó ez? Mit tudhat mást a hálózat az egyik vagy a másik állapotban?

Erre is vannak tippeim, de míg eddig szigorúan és tényeken alapuló következtetésekre alapoztam a gondolatmenetet, innen feltételezések következnek, melyek bizonytásához még hiányoznak kísérletek.

A két állapot között az a különbség, hogy a gamma alatt az aktivitás számos sejtből indul és



SWR állapotban (fent) a hálózat gyenge bemenetet kap és kevés sejtből indul az aktivitás, viszont az erős kapcsolatok miatt sokáig tart a rekurrens kapcsolatrendszerben az aktivitás. Gamma állapotban (lent) az erősn hajtott hálózatban sok sejt aktiválódik, de a gyenge kapcsolatok miatt hamar elhal az aktivitás, a rekurrens feldolgozás nem tart sokáig.

viszonylag gyengén terjed a serkentősejtek között, a visszacsatolt hálózatban csak néhány körig fejlődhet az aktivitás, mielőtt a felépülő gátlás megállítja azt. Az SWR-ek alatt kevés sejtből indul és viszonylag hosszú idő alatt épül fel a visszacsatolt hálózatban egy sok sejtet magába foglaló aktivitás, mely számtalanszor megjárhatja a visszacsatolt hálózatot. Eközben a PV sejtektől származó gyors gátló oszcilláció keskeny időszakokba szorítja mikor tüzelhetnek a sejtek, mielőtt az aktivitás elhal. Ha visszaemlékszünk a a visszacsatolt hálózatok viselkedésénél az attraktorokra és a hegyek-völgyek képre, akkor abban a képben is benne volt, hogy egy hálózat esetében az aktivitás fejődését két dolog határozza meg. Milyen a szinaptikus súlyok által meghatározott domborzat, merre fejlődik az aktivitás, illetve hogy mely pontból indultunk el, mi volt a kezdeti sejtaktivitás mintázat. A szinapszisok súlyai ugye a múltat, a korábban tanultakat hordozzák, az indító sejtaktivitás mintázatok pedig a jelent, mi történik éppen (mi a hálózat bemenete). Gamma alatt az indító aktivitást nagyobb számú sejt határozza meg mind SWR-ek alatt, viszont az utóbbiban jelentősen tovább fejlődik, a szinaptikus súlyok által meghatározott aktivitás. Azaz a gamma aktivitás alatt a sejtek végállapotát erősebben határozza meg a jelen, mint a múlt, mint az SWRek alatt, ahol az aktivitás, a korábban tanultak alapján sokáig fejlődik. A két állapot tehát máshogy dolgozza fel az információkat. A theta alatt történő gamma szakaszok a felderítés alatt valószínúleg valamiféle gyors jelintegrációt jelenthetnek, segítenek előhívni a környezeti ingerek alapján a tárolt információkat. A SWR-ek alatt pedig a theta alatt tárolt egymás után bekövetkező szituációkból áll össze egy összetett „történet", mely a memóriában rögzül.

A fenti példa a hippokampusz és a kolinerg hangolás esetében szemléltette, hogyan tudja ugyanaz a hálózat időosztásos (multiplexelt) módon különbözőképpen feldolgozni a kapott információkat. A többi moduláló hatású ingerületátvivő anyag (szerotonin, dopamin, hisztamin, noradrenalin) hatását még nem vizsgáltuk ilyen részletesen, nem tudjuk mi történik amikor azok aktívak. De azt például tudjuk, hogy a hippokampuszban a szerotonin tartalmú rostok hatékonyan modulálják a dendritikus gátlósejtek működését. Róluk pedig tudjuk, hogy hatékonyan befolyásolják a serkentősejtek dendritfájában a Ca^{2+} áramok erősségét. A Ca^{2+} áramok pedig képesek befolyásolni hogyan integráljanak a sejtek, és milyen erősen működjenek a szinaptikus tanulás mechanizmusai. Feltételezhető tehát, hogy a szerotonin képes befolyásolni mikor tanuljon a hálózat és mikor ne. De ennek bizonyítására még kísérleteket kell végezni, sokat.

Az túra következő szakaszán azt járjuk körbe hogyan vizsgálható a hálózatok állapotváltása és a metahálózatok kölcsönhatása.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az idegsejtek suttogásának meglesése IV: Hogyan vizsgálható az

idegsejtek működése és a tudatállapotok közötti összefüggés?

Ez lesz egy időre az utolsó #agytechnikák bejegyzés, de erre még szükség van ahhoz, hogy visszatérhessünk az #agyséta rovat megakadt gondolatmenetéhez, amiben az agykérgi területek (meta-hálózatok) dinamikáját mutatjuk be.

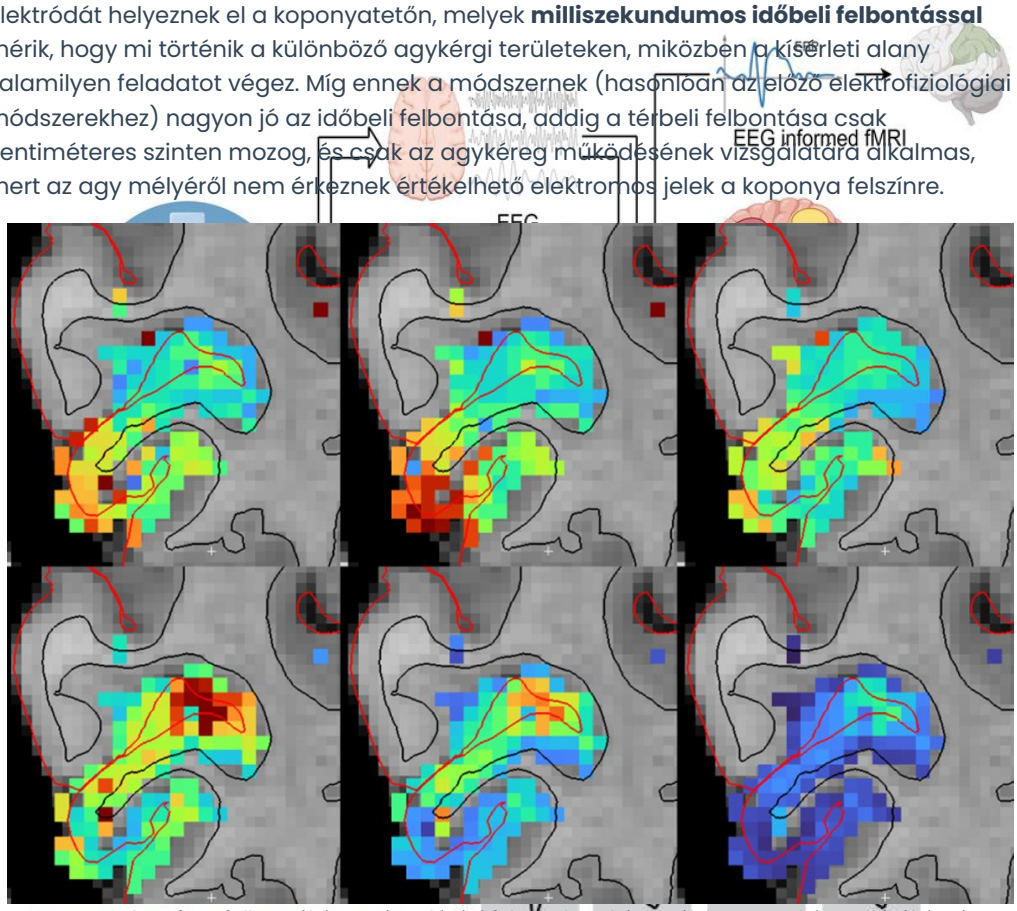
Itt az ideje, hogy beszéljünk arról, hogy az elmúlt másfél évtizedben mi volt az a technikai fejlődés, ami lehetővé tette a neuropszichológia számára, hogy az idegsejtek működése, valamint a gondolkodás, a döntés, a tudatosság folyamatai között megtalálhassuk a kapcsolatot.
Az előző #agyséta bejegyzésekben, ahol a hippokampusz működését és állapot-átkapcsolásait mutattuk be, elsősorban olyan elektrofiziológiai módszereket használtunk, melyek fél évszázada elérhetőek: egyedi sejtek és a kishálózatok működését mértük intracelluláris (egyedi sejtekbe szúrt) és EEG elektródákkal (melyek a hálózat kollektív aktivitását mérik). Ezáltal megismertük az összefüggést a hálózat és a sejtek működése között.

Elsősorban a számítási kapacitás hihetetlen megnövekedése miatt, a közelmúltban megjelentek olyan új módszerek: 1) az **optogenetikával kombinált két-foton mikroszópia**, 2) a nagyon **sok csatornás EEG és sejt elvezetések**, valamint 3) a **funkcionális magmágneses rezonanciás képalkotás** (functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI), melyek lehetővé teszik, hogy egyszerre több ezer idegsejt és több száz agyterület működését figyeljük meg, akár szabadon mozgó, feladatokat végző állatokban -vagy a nem invazív módszerek (fejtetői EEG és fMRI) esetében- emberekben.

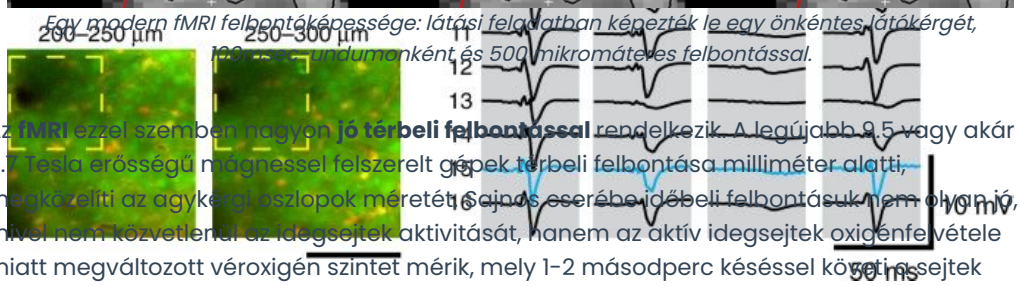
Kezdjük a sejtek és kishálózatok felől, és haladjunk az agyi területek működésének vizsgálata felé. A molekuláris biológusok által fejlesztett optogenetika lehetővé teszi, hogy az idegsejtek DNS-ébe olyan géneket építsünk be, melyeket kifejezve az idegsejtek vagy fényt bocsájtanak ki, amikor működésbe lépnek (erős leegyszerűsítés de a célunknak megfelel), vagy fény hatására működésük nő avagy csökken. Két-foton mikroszkópokkal, a működő agyban készíthetők mozik arról melyik pillanatban mely idegsejtek kapcsolódnak be. Ezeket a módszereket részletesebben bemutattuk jónéhány #agytechnikák bejegyzésben (kalcium és voltage imaging). Használatukkal tizedmásodperces felbontással vizsgálhatjuk több ezer idegsejt működését. Emlékeztek? Az idegsejtek aktivitásmintázata hordozza az információt, azaz ezzel a módszerrel kiolvashatjuk az agy kódját, információ tartalmát, és annak változását pillanatról pillanatra.
A másik módszer, mely alkalmas több száz idegsejt működésének meglesésére, az a szilikonból félvezető technikákkal készült elektróda fésűk alkalmazása. Egy-egy ilyen összetett elektróda több ezer elektromos érzékelő végződést hordoz, melyekkel a közelükben levő sejtek működése mérhető. Ennek a módszernek a térbeli felbontása nem olyan jó, mint az optogenetikai módszeré, viszont az időbeli sokkal jobb, a másodperc ezredrésze alatt zajló folyamatokat képes megfigyelni. Ezekről is írtunk már bővebben. Mivel ezekhez a módszerekhez az agyat meg kell bolygatni, vagy azért, hogy transzgénikus fehérjéket fejezzünk ki, vagy azért, hogy elekródákat juttassunk a sejtek közelébe, értelemszerűen ezek a kísérletek emberek esetében nem végezhetők el. De mivel az emberi és állati agyak felépítési alapelvei jelentősen megegyeznek, már így is nagyon sokat tanultunk az agy információfeldolgozásának alapelveiről.

Míg ezek a módszerek finom térbeli felbontásúak és alkalmasak a kishálózatok működési törvényszerűségeinek feltárására, nem képesek egész agy méretben működni (apró agyak -mint például zebrahal vagy fonálféreg- esetében igen). Szerencsére léteznek komplementer módszerek, mint a sokcsatornás EEG és az fMRI, melyek alkalmasak akár egy egész emberi agy vizsgálatára. A **sokcsatornás EEG** vizsgálatok során több száz EEG

elektródát helyeznek el a koponyatetőn, melyek **milliszekundumos időbeli felbontással** mérik, hogy mi történik a különböző agykérgi területeken, miközben a kísérleti alany valamilyen feladatot végez. Míg ennek a módszernek (hasonlóan az előző elektrofiziológiai módszerekhez) nagyon jó az időbeli felbontása, addig a térbeli felbontása csak centiméteres szinten mozog, és csak az agykéreg működésének vizsgálatára alkalmas, mert az agy mélyéről nem érkeznek értékelhető elektromos jelek a koponya felszínre.



Egy modern fMRI felbontóképessége: látási feladatban képezték le egy önkéntes látókérgét, 100 ms-onként és 500 mikrométeres felbontással.



A fenti módszerek kombinációjával az egyes módszerek hiányosságait a kiegészítő módszer pótolja. Grafénből készült áttetsző elektródák használatával a sokcsatornás mezőpotenciál elvezetést és a 2-foton képalkotást kombinálni lehet. Az optikai módszer térbeli felbontását kiegészíti az elektromos módszer időbeli felbontása. Így részletesebb vizsgálható az idegsejtekből álló kishálózatok (agyterületek) működése az az elektródák elhelyezkedése alatt elképzelt területen kívüli agyterületek egyes sejtjeinek aktivitásával. Rögzíthető az fMRI-felbontásnál egyes sejtek aktivitása, és ezek kapcsolata az időben finoman változó elektromos jelek a koponyán kívül elhelyezett elektródákra.

Az **fMRI** ezzel szemben nagyon **jó térbeli felbontással** rendelkezik. A legújabb 9,5 vagy akár 11,7 Tesla erősségű mágnessel felszerelt gépek térbeli felbontása milliméter alatti, megközelíti az agykérgi oszlopok méretét. Sajnos cserébe időbeli felbontásuk nem olyan jó, mivel nem közvetlenül az idegsejtek aktivitását, hanem az aktív idegsejtek oxigénfelvétele miatt megváltozott véroxigén szintet mérik, mely 1-2 másodperc késéssel követi a sejtek aktiválódását. Az időbeli felbontást a nagyon erős mágnesek sem tudják javítani.

Szerencsére a kishálózatok (sejt szint) és ameta-hálózatok (agyterületek) működését mérő elektromos és képalkotó módszerek kiegészítik egymást a tér és az időbeli felbontásban. Rögzíthető az fMRI-felbontásnál egyes sejtek aktivitása, és ezek kapcsolata az időben finoman változó elektromos jelek a koponyán kívül elhelyezett elektródákra.

Röviden az fMRI-felbontásnál egyes sejtek aktivitása, és ezek kapcsolata az időben finoman változó elektromos jelek a koponyán kívül elhelyezett elektródákra.

módszerekkel tudjuk egyszerre akár többezer sejt aktivitását mérni.

Azaz felépült a híd az agyműködés sejt- és viselkedés-szintű vizsgálata között. Meg tudjuk nézni, hogy egy bonyolult döntési folyamatban mely agyterületek idegsejtjei vesznek részt, és hogyan működnek a döntés különböző fázisaiban. A megismerés alagútját két irányból ásó diszciplínák képviselői, **a neurobiológusok és a pszichológusok - 200 év után -** középen **összeértek, és megerősödött a neuropszichológia diszciplínája.**

Azt, hogy a hatalmas mennyiségű mért adatból hogyan értjük meg az agyműködés szabályait, a következő bejegyzésben mutatja be.

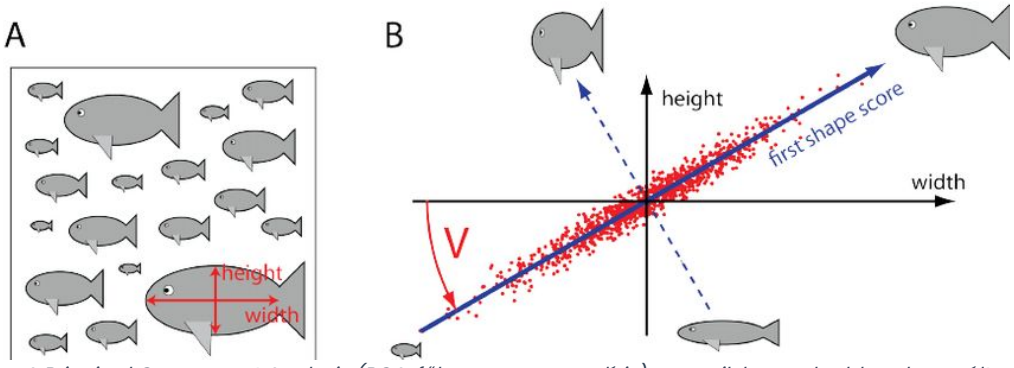
Szerző: **Gulyás Attila**

Az idegsejtek suttogásának meglesése IV: Hogyan értelmezzük amit

mértünk?

Hogy az előző bejegyzésben bemutatott mérések alapján megértsük, hogyan hangolódnak egymáshoz az egyterületek az agyműködés során, egy meglehetősen bonyolult rejtvény kell megfejteni: az egy-egy kísérlet során keletkező hatalmas adatmennyiséget (naponta akár több TB) zajmentesíteni, majd értelmezni is kell. Ebben matematikusok és fizikusok által fejlesztett összetett statisztikai módszerek és modellek segítenek.

A nagyszámú csatornán idősorokat rögzítünk. Azaz, hogy egyes időpotkban hogyan változika a jelek erőssége (EEG: feszültség, fMRI: vérátáramlás). A rögzített idegi aktivitás elemzése rendszerint azzal kezdődik, hogy a kutató kezelhető formára alakítja az adatokat. A több száz vagy ezer párhuzamos jelben rengeteg az átfedő információ, ezért **első lépésként** gyakran **dimenziócsökkentő eljárásokat alkalmaznak.**

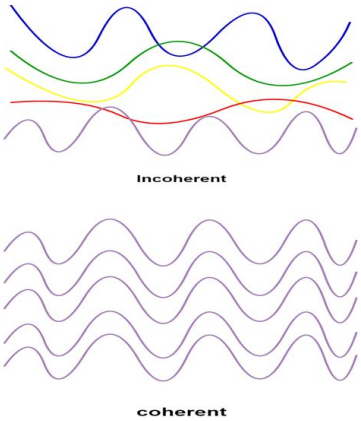


A Principal Component Analysis (PCA, főkomponens analízis) az egyik leggyakrabban használt dimenzió redukciós eljárás. Egy összetett adatszerkezetben megpróbálja megtalálni a legjellemzőbb összefüggéseket. A példa azt mutatja be hogyan lehet a halak alakeloszlásának főbb vonásait megtalálni. Ha minden egyes hal esetében elhelyezünk egy pontot egy 2D grafikonon, melynek koordinátáit a hal hossza és magassága szabja meg, kapunk egy pontfelhőt. Általában a hoszabb halak magasabbak is, ezért egy átlósan ferde pontfelhőt kapunk, mely azért nem tömör, mert a halak viszonylagos magassága variál. A PCA megkeresi, mely irányban variál legjobban a pontfelhő. Az első főkomponens ez lesz, ezt forgatjuk be egy új ábra vízszintes tengelyébe, ennek jelentése mondjuk, hogy mennyire masszív egy hal. A második főkomponens a halak tömzsisége lesz. Ez ugye még nem dimenzió redukció, csak máshogy értelmezés. De ha több mért adatunk van, lesznek olyan komponensek, amik mentén nemigen van változatosság, ezeket kiejthetjük. Kevesebb dimenzióban könyebben megtaláltuk a fontosabb összefüggéseket.

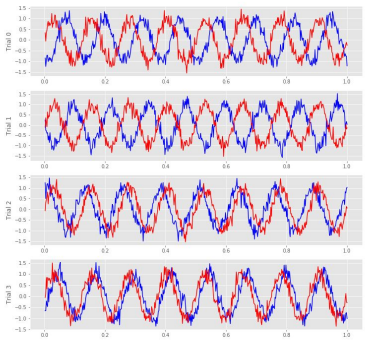
Ilyenkor olyan matematikai módszerek, mint a főkomponens-analízis (PCA), faktor analízis, vagy különféle látens változós modellek segítenek megtalálni azokat a **rejtett mintázatokat, amelyek az idegsejt populációk, agykérgi területek közös működését adják.** Ez nem magyarázat, inkább térkép: megmutatja, merre érdemes tovább keresni.

Ha már látjuk, hogyan mozog együtt a rendszer, **a következő kérdés az időbeliség.** Idősorelemző eszközökkel vizsgálható, hogy egy aktivitás mennyire függ a saját múltjától, illetve, hogy különböző csatornák között milyen összefüggésben jelennek meg hasonló változás. A spektrális, Fourier és wavelet elemzések, **feltárják egy-egy csatornán belül a ritmusokat és oszcillációkat,** míg a koherencia azt mutatja meg, hogy az egyes csatornák (agyterületek működése) **mennyire összehangoltak.**

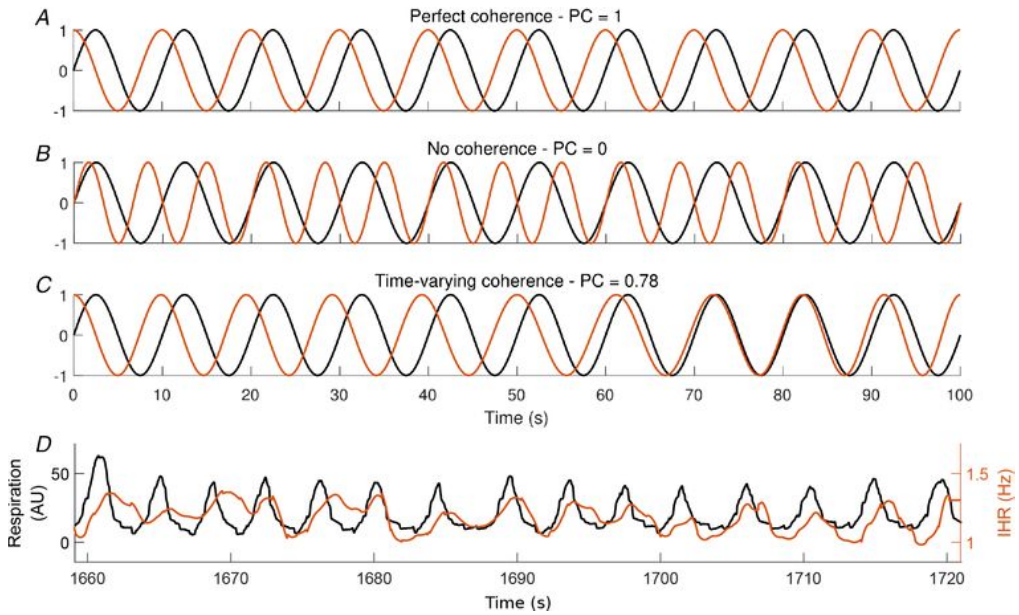
> A fizikusok a jelek együttmozgását a koherenciával jellemzik. Két jel akkor koherens ha a csatornákon hasonló frekvenciák, hasonló fázisokban jelennek meg.



A felső részen eltérő színű, eltérő frekvenciájú fényhullámok láthatók, ilyen a fehér fény, ami nem koherens. Ha a fényhullámok egyforma frekvenciájúak és fázisban is megegyeznek (alul) a fény koherens, ilyen a lézerfény.



Két jel akkor is lehet koherens ha fázisaik nem csak frekvenciáik egyeznek meg. A lényeg az, hogy az idővel egyforma mértékben legyen az egyik jel előbb vagy hátrébb. Ez egy összehanglódást jelent a két jel között, Ami összefüggésre utalhat.

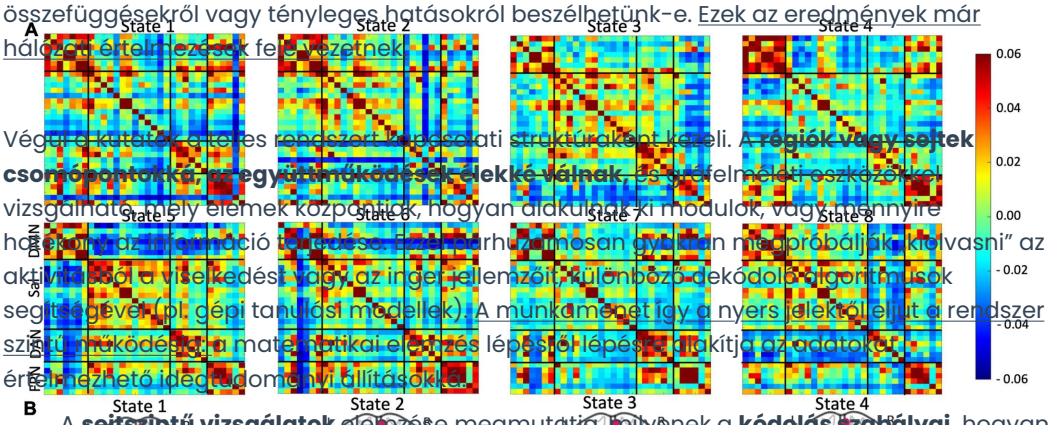


Az A-C sorok egy teljesen koherens, egy nem koherens, és egy időben változó koherenciájú jelpárt mutatnak. Az alsó a szívverésfrekvencia (narancs) és a lélegzés (fekete) összefüggését mutatja, melynél a koherencia időben változik. A PC érték a két csatorna koherenciájának erősségét mutató szám. Ezeket az értékeket ábrázolják az összes csatorna-pár esetében és használják később az összefüggések erősségének kiszámolására.

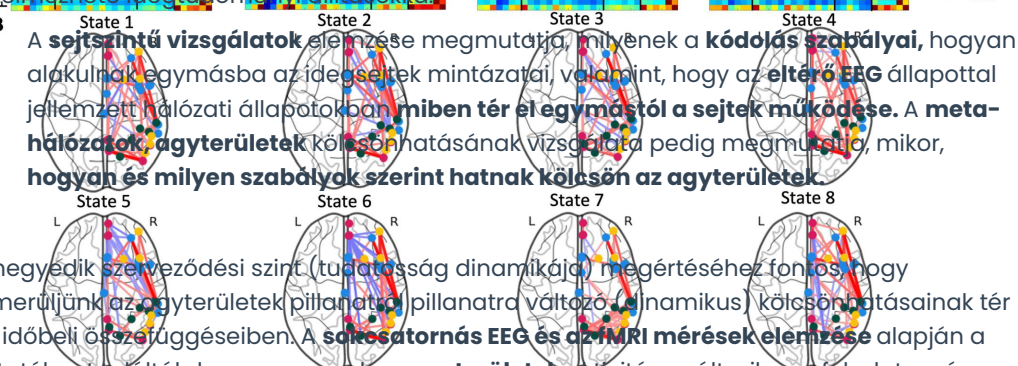
Ha sok csatornánk van (márpedig az fMRI és sokcsatornás EEG esetében igen). Akkor páronként ki lehet számolni a csatornák közötti koherenciák összefüggéseit és egy ábrán megjeleníteni. Ezen mintázatok alapján lehet kiszámítani, hogy egyes időpillanatokban mely agyterületek működnek együtt.

A harmadik lépésben **a hangsúly gyakran az együtt mozgásról az irányokra, egyedi eltérésekre tolódik.** Itt olyan megközelítések kerülnek előtérbe, amelyek azt vizsgálják, vajon egy jel változása segít-e előre jelezni egy másik későbbi alakulását. A **kauzalitás elemzések** (pl. Granger), az **információelméleti mutatók** (transfer entropy) vagy a biológiai modellekbe ágyazott kauzális becslések, mind azt próbálják eldönteni, hogy puszta

összefüggésekről vagy tényleges hatásokról beszélhetünk-e. Ezek az eredmények már hálózati értelmezések felé vezetnek.



Végül a kutatók a teves rendszert kapcsolati struktúraként kezeli. A **régiók vagy sejtek csomópontokká, az együttműködések élekké válnak**, és gráfelméleti eszközökkel vizsgálható, mely elemek központiak, hogyan alakulnak ki modulok, vagy mennyire hatékony az információ terjedése. Ezzel párhuzamosan gyakran megpróbálják „kiolvasni" az aktivitásból a viselkedést vagy az inger jellemzőit, különböző dekódoló algoritmusok segítségével (pl. gépi tanulási modellek). A munkamenet így a nyers jelektől eljut a rendszer szintű működésig: a matematikai elemzés lépésről lépésre alakítja az adatokat értelmezhető idegtudományi állításokká.



A **sejtszintű vizsgálatok** elemzése megmutatja, milyenek a **kódolás szabályai,** hogyan alakulnak egymásba az idegsejtek mintázatai, valamint, hogy az **eltérő EEG** állapottal jellemzett hálózati állapotokban **miben tér el egymástól a sejtek működése.** A **meta-hálózatok, agyterületek** kölcsönhatásának vizsgálata pedig megmutatja, mikor, **hogyan és milyen szabályok szerint hatnak kölcsön az agyterületek.**

A negyedik szerveződési szint (tudatosság dinamikája) megértéséhez fontos, hogy elmerüljünk az agyterületek pillanatról pillanatra változó (dinamikus) kölcsönhatásainak tér és időbeli összefüggéseiben. A **sokcsatornás EEG és az fMRI mérések elemzése** alapján a kutatók azt találták, hogy nem csak az **agyterületek** aktivitása változik egy feladat során, hanem az is, hogy **mennyire vannak összehangolva, mennyire együtt változnak.** Ezeknek az összefügéseknek az ismeretében hálózatelemzési módszereket használva felrajzolták azt, hogy **egy adott pillanatban milyen agyterületek lépnek kapcsolatba egymással, és ezek a kölcsönhatások hogyan változnak.** Rávetítve ezt az állandóan változó hálózatot (gráfot, mely csomópontokból és kapcsolatokból áll) az agyterületek korábban megismert, eltérő feladatokat ellátó területeinek térképére, megérthetjük milyen típusú feldolgozás történik egy-egy pillanatban. Fontos kiemelni, hogy itt tized-század másodpercek alatt változik az egymással kapcsolatban levő területek kapcsolatrendszere egy feladat elvégzésének eltérő fázisaiban.

fMRI mérések alapján 8 agyi állapotról készült 8 koherencia mátrix alapján 8 eltérő agyi kapcsolati hálózat rajzolható. Ismerve az egyes agytdrületek funkcióját, megtudhatjuk mely funkcionális területek kapcsolódnak össze egy feladatmegoldás fázisai során.

Ezekből a vizsgálatából kiderült, hogy **az agynak feldolgozási állapotai vannak.** Gyors egymásutánban, **a környezetből vagy a szervezetből érkező információ függvényében kapcsol** az agy működési módok között, amelyekben az agyterületek eltérő hálózatokba kapcsolódnak. Az eltérő időben, eltérő feladatokat megoldó, időlegesen összekapcsolt hálózatok lehetnek részben átfedőek, de elkülönültek is. Hasonlóan ahhoz, ahogy például egy asztalosműhelyben különböző feladatok megoldásához más szerszámokat és műveleteket használunk. De akadnak olyan szerszámok vagy műveletek is, amiket sok esetben gyakran együtt használunk, és olyan esetek is, amikor eltérő szerszámkészletekkel eltérő műveleteket végzünk.

A következőkben ezeket a funkcionális hálózatokat nézzük meg részletesebben.

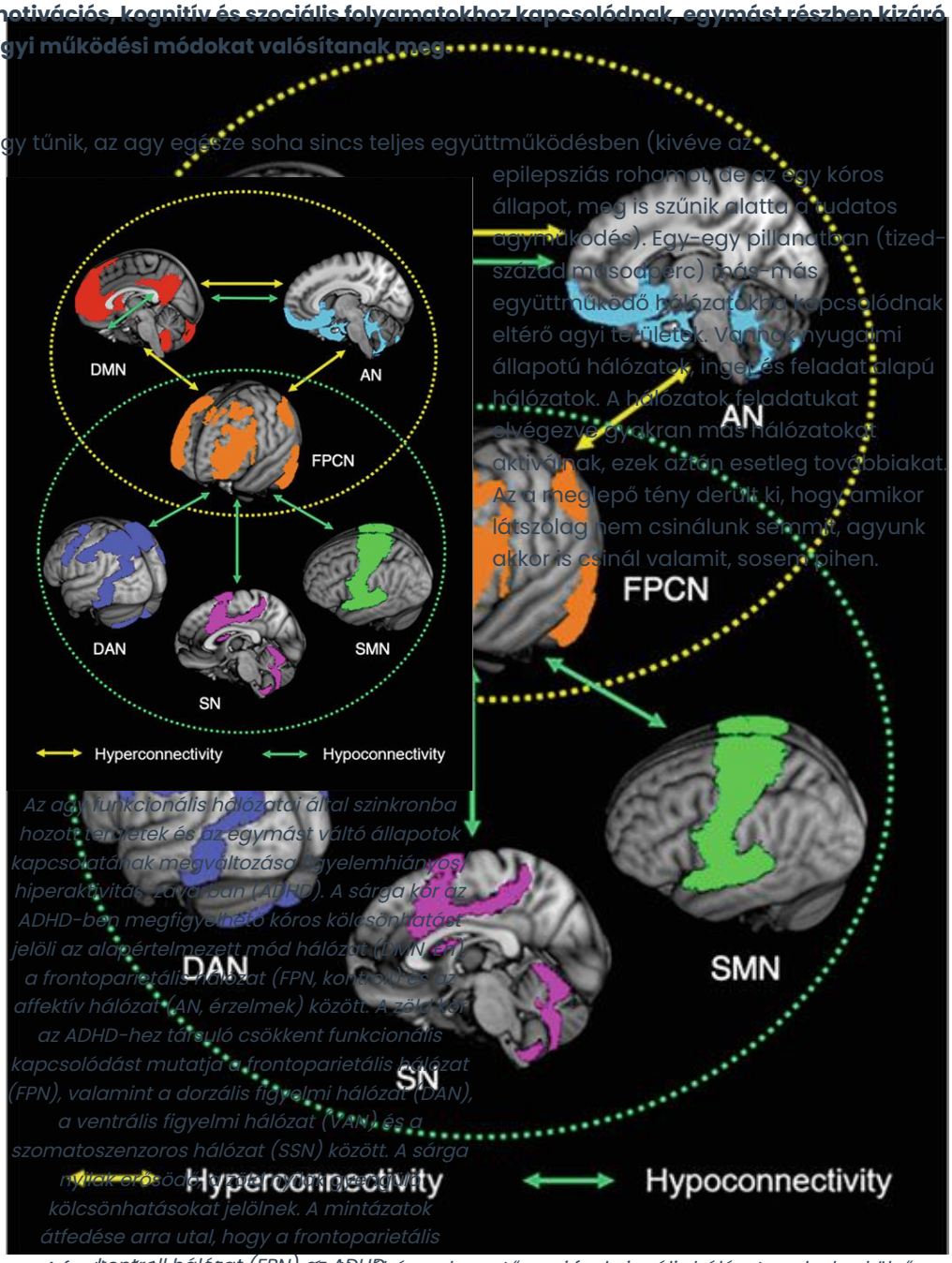
Szerző: **Gulyás Attila**

Az agy funkcionálisan azonosított hálózatai I: Miért vált az agy pillanatról-pillanatra

Az fMRI-vizsgálatok (nyugalmi állapotú és a feladat-alapú mérések) alapján az derült ki, hogy az agyterületek nem véletlenszerűen aktiválódnak, hanem egymást váltó, számos agyterületre kiterjedő jellegzetes funkcionális hálózatokba kapcsolódnak, egy-egy feladat vagy részfeladat hatékony megoldására. Ezek a hálózatok különféle érzékszervi,

motivációs, kognitív és szociális folyamatokhoz kapcsolódnak, egymást részben kizáró agyi működési módokat valósítanak meg.

Úgy tűnik, az agy egésze soha sincs teljes együttműködésben (kivéve az epilepsziás rohamot, de az egy kóros állapot, meg is szűnik alatta a tudatos agyműködés). Egy-egy pillanatban (tized-század másodperc) más-más együttműködő hálózatokba kapcsolódnak eltérő agyi területek. Vannak nyugalmi állapotú hálózatok, inger- és feladat alapú hálózatok. A hálózatok feladatukat elvégezve gyakran más hálózatokat aktiválnak, ezek aztán esetleg továbbiakat. Az a meglepő tény derült ki, hogy amikor látszólag nem csinálunk semmit, agyunk akkor is csinál valamit, sosem pihen.



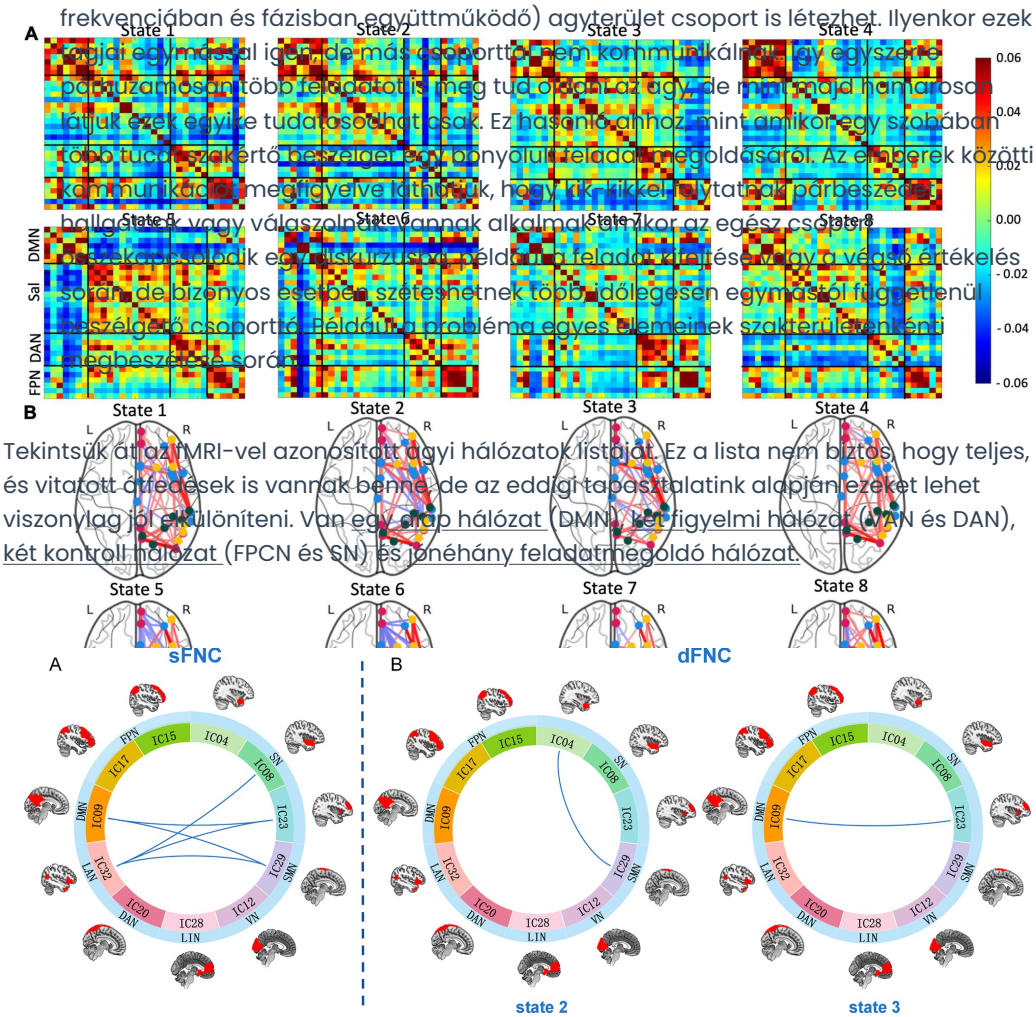
Az agy funkcionális hálózatai által szinkronba hozott területek és az egymást váltó állapotok kapcsolatának megváltozása figyelemhiányos hiperaktivitás-zavarban (ADHD). A sárga kör az ADHD-ben megfigyelhető kóros kölcsönhatást jelöli az alapértelmezett mód hálózat (DMN, ön) a frontoparietális hálózat (FPN, kontroll) és az affektív hálózat (AN, érzelmek) között. A zöld kör az ADHD-hez társuló csökkent funkcionális kapcsolódást mutatja a frontoparietális hálózat (FPN), valamint a dorzális figyelmi hálózat (DAN), a ventrális figyelmi hálózat (VAN) és a szomatoszenzoros hálózat (SSN) között. A sárga nyilak erősödő, a zöldek gyengülő kölcsönhatásokat jelölnek. A mintázatok átfedése arra utal, hogy a frontoparietális kontroll hálózat (FPN) az ADHD patofiziológiájának egyik érintett hálózata.

A fenti módszerekkel azonosított néhány alapvető agyi funkcionális hálózat, melyek a külső ingerek és belső keztetések hatására követik egymást. Ezekről lesz szó a továbbiakban.

Jelenleg, ezen hálózatok vizsgálata egy friss, forrongó tudományterület, naponta változó elméletekkel és új adatokkal. Amit én itt most összefoglalok, az évek múlva már finomodhat, esetleg elvetésre kerül. Mindenesetre megpróbálom a korábbiakkal összhangban összefoglalni, amit jelenleg (2026 eleje) tudunk.

> Egy fontos megjegyzés: Ezeket a funkcionális hálózatokat annak alapján azonosították, hogy egyes időpillanatokban milyen összefüggést lehet kimutatni az agyterületek fMRI jelének vagy EEG aktivitásának változásában. Az egyes funkcionális állapotok alatt többféle típusú EEG aktivitás is előfordulhat az egyes agyterületeken. A hangsúly azon van, hogy mely területek között figyelhető meg koherencia, az a jelenség, hogy az EEG hullámok egymáshoz frekvenciában és fázisban kapcsolódnak. Ha a frekvencia és a fázis nem csatolódik akkor jelen elképzelésünk szerint nincs hatékony kommunikáció az agyterületek között, hiszen ilyenkor nem kerülhetnek együttműködő, információ feldolgozó kapcsolatba az agyterületek. Egyszerre akár több koherens (azaz

frekvenciában és fázisban együttműködő) agyterület csoport is létezhet. Ilyenkor ezek agyi egymással igen, de más csoporttól nem kommunikálnak így egyszerre adatuzamosan több feladatot is meg tud oldani az egy, de mint majd hamarosan látjuk ezek egyike tudatosodhat csak. Ez hasonló ahhoz, mint amikor egy szobában több tucat szakértő beszélget egy bonyolult feladat megoldásáról. Az emberek közötti kommunikációt megfigyelve láthatjuk, hogy kik kikkel folytatnak párbeszédet, hallgatnak, vagy válaszolnak. Vannak alkalmak amikor az egész csoport összekapcsolódik egy diskurzusra például a feladat kitűzésekor vagy a végső értékelés során, de bizonyos esetben szétesnek több, időlegesen egymástól függetlenül beszélgető csoportra. Például a probléma egyes elemeinek szakterületenkénti megbeszélésére során.



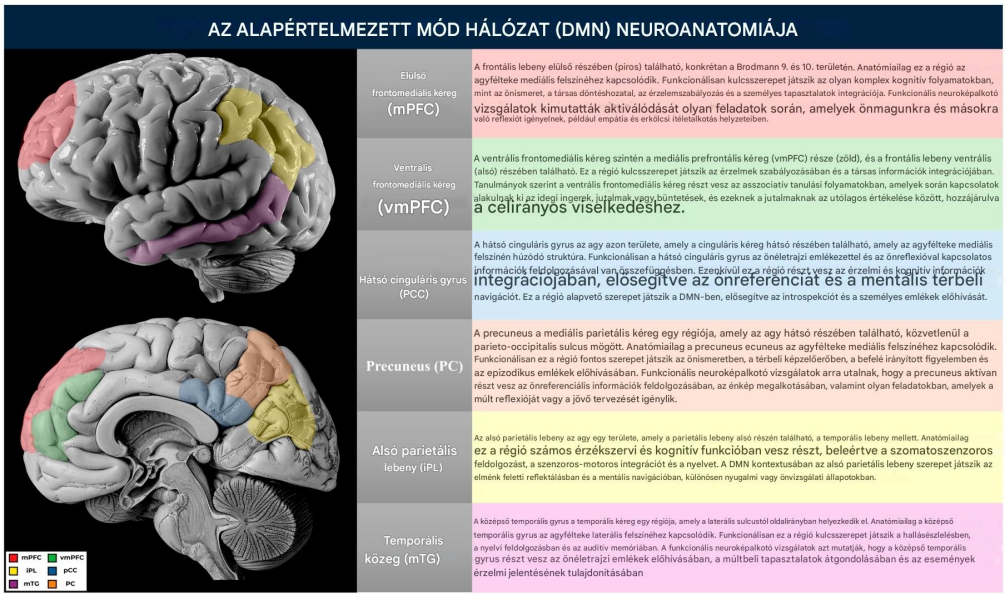
Tekintsük át az fMRI-vel azonosított agyi hálózatok listáját. Ez a lista nem biztos, hogy teljes, és vitatott átfedések is vannak benne, de az eddigi tapasztalatink alapján ezeket lehet viszonylag jól elkülöníteni. Van egy alap hálózat (DMN), két figyelmi hálózat (SN és DAN), két kontroll hálózat (FPCN és SN) és jónéhány feladatmegoldó hálózat.

A funkcionális hálózatok egészséges emberben jellegzetes mintázatban váltják egymást. A tudatot érintő megbetegedések során a mintázatok váltakozása megváltozik. Az ábra azt mutatja, hogy késői megjelenésű depresszóban hogyan változik meg a funkcionális hálózatok kölcsönhatása. A) sFNC (static functional connectivity) azt mutatja meg, hogy egy depressziósban mely hálózatok közötti kölcsönhatások gyengülnek (kék vonalak) úgy általában. B) a dFNC azt mutatja, hogy eltérő rövidebb időszakok, agyi állapotok alatt mely kapcsolatok gyengülnek. Abbreviations: IC: independent component X (egymástól független működésű agyterületek, melyek a funkcionális hálózatokat alkotják); DMN: default mode network (Én); FPN: frontoparietális hálózat (tervezés); SN: salience network (jelentőség észlelés); SMN: szenzorimotoros hálózat; VN, látó hálózat; LIN: limbikus (érzelmi) hálózat; DAN: dorsal attention network; LAN: nyelvi hálózat

A Default Mode Network (DMN), azaz alapértelmezett működési hálózat az, amit leggyakrabban használ az agy. Akkor működik, amikor a kísérleti alanyok látszólag éppen nem csinálnak semmit, nem fókuszáltak, de éberek, egy feladat kezdetére várakoznak, vagy már befejeztek egy feladatot és nincs külső vagy belső inger. Kezdetben feladat-negatív hálózatnak is nevezték, de ezt később elvetették, mivel számos kognitív feladatban is aktív. Potenciálisan ez az ÉN neurobiológiai alapja, mivel aktív, amikor az egyén önmagára vagy másokra gondol, emlékszik a múltra és tervezi a jövőt. Koherens "belső narratívát" hoz létre az énérzés felépítéséhez. Szemmel láthatólag amikor nincs éppen megoldandó külső feladat, magunkkal kezdünk el foglalkozni. Nagyon úgy tűnik ez tesz minket emberré.

Milyen esetekben aktív?

- Önéletrajzi elemek: Emlékek, eseményekről, tényekről és önmagunkról
- Önhivatkozás: Önmagunk tulajdonságaira és leírásaira való hivatkozás
- Önérzelem: Reflektálás a saját érzelmi állapotunkról
- Másokra gondolva



A DMNben résztvevő agyterületek. Elnézést a suta fordításért.

- Mások gondolataira gondolva, és arra, hogy mit tudnak vagy nem tudnak: Elmeelmélet (Theory of Mind)
- Mások érzelmeinek megértése és érzéseik átérzése
- Erkölcsi érvelés: Egy cselekedet igazságos és igazságtalan eredményének meghatározása
- Társadalmi értékelések: Jó-rossz attitűdítéletek a társadalmi fogalmakról
- Társadalmi kategóriák: Egy csoport fontos társadalmi jellemzőinek és státuszának reflektálása
- Társadalmi elszigeteltség: A társadalmi interakció észlelt hiánya
- Emlékezés a múltra és a jövőre való gondolás
- A múltban történt események felidézése
- A jövő elképzelése: A jövőben esetlegesen bekövetkező események elképzelése
- Epizodikus memória: Részletes emlékezet, amely az idő konkrét eseményeihez kapcsolódik
- Történet megértése: Egy narratíva megértése és emlékezése
- Visszajátszás: Nemrégiben szerzett memórianyomok konszolidálása

Funkció: Belső gondolkodás, önreflexió, múltidézés, jövőelképzelés, mentális szimuláció
Aktív: Nyugalmi állapotban, amikor nem külső feladatra figyelünk
Főbb régiók: medialis prefrontális kéreg, posterior cinguláris kéreg, precuneus, angularis gyrus (inferior parietális lebeny), hippokampusz (memória)

A következő bejegyzésben a belső és külső ingerekre aktiválódott hálózatokat vesszük át.

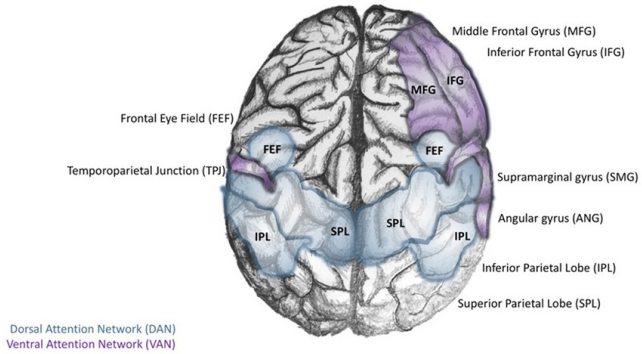
Szerző: **Gulyás Attila**

Az agy funkcionálisan azonosított hálózatai II: Ki mikor kapcsol be és mit csinál?

Akkor nézzük a belső és külső ingerekre aktiválódó hálózatokat, melyek a DMN helyére lépnek amikor „helyzet van”.

A két figyelmi hálózatból, egyik a külvilágra, a másik belső történésekre figyel:

Ventral Attention Network (VAN), alsó figyelmi hálózat, melyet inkább a külvilág ingerei hajtanak, bottom-up figyelem, akkor kapcsolódik be amikor valami megszakítja a fókuszt.
Funkció: Váratlan ingerek, figyelem elterelése, egy inger jelentőségének megállapítása
Aktív: Ha valami hirtelen vagy szokatlan történik.



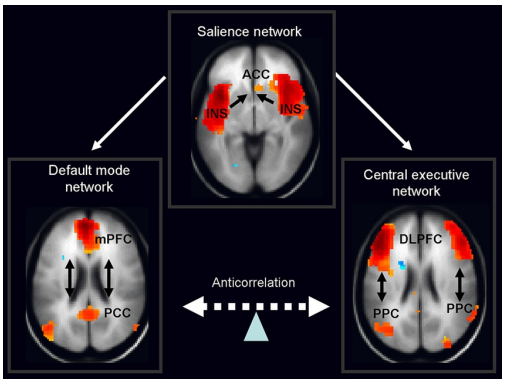
A dorzális és ventrális figyelmi hálózatok agykérgi területei. A DAN (kék) a hátsó parietális lebeny (dPPL) és a dorzális frontális kéreg [dPFC – frontális tekintésmező (FEF)] közötti kölcsönös kapcsolatrendszer által definiált. A bal oldali dPPL aktivitása az inger–válasz feladatok előkészítő lépésének tekinthető; a feladathoz fontos ingerekre irányuló szelektív figyelem kognitív jelzőingerek kialakulásához vezet. Ezzel párhuzamosan a dorzális prefrontális kéreg–frontális tekintésmező (dPFC–FEF) aktivitása összehangolja a feladat szempontjából fontos ingerhez kapcsolódó motoros válaszokat. A VAN (lila) a jobb temporoparietális lebenyben (TPL) és a ventrális frontális kéregben (vPFC; amely az alsó és középső frontális tekervényből, valamint a frontális operculumból áll) helyezkedik el.

Főbb területek: temporoparietális junkció (TPJ), inferior frontális gyrus

Dorsal Attention Network (DAN), felső figyelmi hálózat, mely elsősorban belső késztetésből vezérelt, top-down figyelmet okozza, folyamatosan aktív míg fókuszálunk. Ezt a hálózatot feladat-pozitív hálózatnak is nevezték, hogy szembeállítsák a DMN hálózattal. Ez a dichotómia azonban ma már félrevezetőnek tekinthető, mert a DMN hálózat aktív lehet bizonyos kognitív feladatokban is.
Funkció: Célirányos figyelem, elsősorban térbeli (főleg vizuális) figyelem, keresés, szemmozgások irányítása
Aktív: Amikor tudatosan irányítjuk a figyelmünket
Főbb régiók: intraparietális sulcus, dorsolateralis prefrontális kéreg, frontális szemmezők, kisagy

A két vezérlő (control) hálózat, a megfelelő pillanatokban a fenti figyelmi hálózatokat kapcsolják be.

Frontoparietal Control Network (FPCN) vagy Executive Control Network (ECN), azaz első falilebeny hálózat vagy végrehajtó funkció hálózat. Elsősorban projekt vezérelt. Elengedhetetlen a szabályalapú problémamegoldáshoz, a munkamemóriában lévő információk aktív karbantartásához és manipulálásához, valamint a célorientált viselkedés keretében történő döntéshozatalhoz.
Funkció: Végrehajtó kontroll, stratégiai döntések, feladat-váltás, rugalmas szabályozás, szabályozza a DMN és DAN/VAN kapcsolást, mikor mit aktiváljunk. Eldönti, hogy a VAN által behozott külső ingerre tényleg át kell-e váltani a figyelmet, vagy inkább maradni kell a DAN által fenntartott fókuszon.



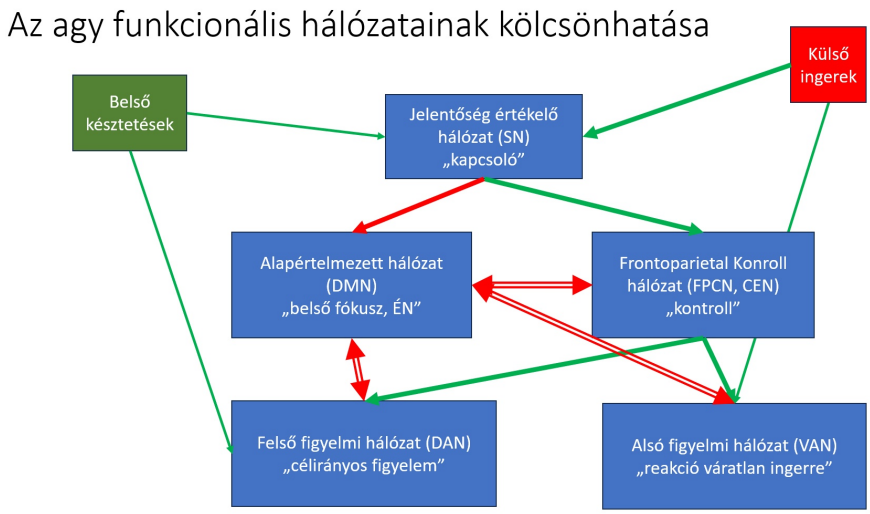
A 3 meghatározó hálózat elhelyezkedése és kölcsönhatása. Az SN ad súlyt annak, hogy az ingerek függvényében az FPCN/ECN vagy a DMN legyen aktív. A két terület aktivitása kizárja egymást

Főbb régiók: dorsolaterális prefrontális kéreg, inferior parietális lebeny, néha kapcsolódik: dorsális ACC, anterior insula.

Salience Network (SN), feltűnőség/ jelentőség hálózat. Elsősorban inger vezérelt. Az érzékszervi, érzelmi és kognitív információk integrálásával a SN számos összetett funkcióhoz járul hozzá, beleértve a kommunikációt, a szociális viselkedést és az önreflexiót. "Észreveszi" amikor válaszolnunk kell, vagy változtatnunk a viselkedésünkön. pl. társas helyzetben.
Funkció: gyors figyelmi váltások kezdeményezése a fontos ingerek alapján, motivációs jelentőség észlelése (jutalom/ büntetés), belső állapotokra való figyelem. Jelzi az FPCN-nek, hogy mikor kell váltani a DMN és a DAN/VAN között (a tapasztalatok szerint agyunk rendszeresen vált a belső és a külső figyelem között, ebben is van szerepe), de közvetlenül is bekapcsolhatja a VANt.
Főbb régiók: anterior insula, anterior cinguláris kéreg (ACC), amigdala, hipotalamusz (alkalmanként)

Mindkét utóbbi hálózat szerepet játszik a váltásokban. De míg az FPCN lassan, tudatosan aktiválódik és fontos a célvezérelt, tervezett viselkedés szervezésében, szabálytartásban, feladatra irányuló figyelemben, addig az SN gyorsan, hirtelen ingerekre kapcsol be, szorosan összefonódik az autonóm idegrendszer válaszaival, azaz érzelmi és testi állapotainkkal.

Például, amikor egy tesztet írsz, és a feladatokra koncentrálsz, akkor az FPCN aktiválja a DANt. Ha azonban hirtelen felvillan a tűzjelző, vagy megemelkedik a pulzusod, azonnal elterelődik a figyelmed, mert az SN aktiválódik és rövid időre bekapcsolja a VANt. A SN ezt követően „szólhat" az FPCN-nek, hogy váltson feladatot vagy fókuszt. A hosszútávú, tervezett és hirtelen felbukkanó, nem tervezett feladatokat megoldó szakemberek szerepének eltérése hasonlít ehhez. A mérnökök igyekeznek úgy megtervezni egy házat, hogy abban ne üssön ki tűz (FPCN és DAN), de ha kiüt (SN észreveszi), nem rájuk van szükség, hanem a katasztrófaelhárítókra és mentősökre (VAN).

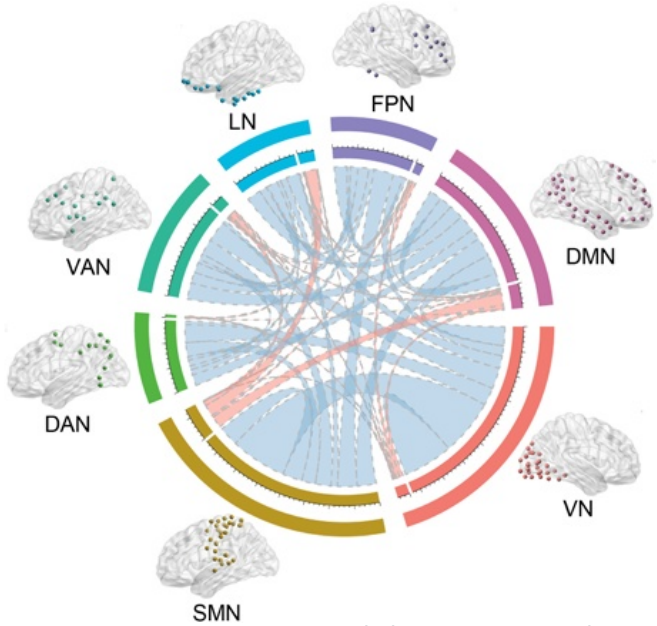


A funkcionális hálózatok egymásra hatása. Amikor épp nincs se külső, se belső inger a DMN aktív. Amikor egy környezeti inger vagy belső késztetés felhívja az SN figyelmét az gátolja a DMNt és

serkenti a FPCNt. Az FPCN az inger/feladat függvényében aktiválja a VANt vagy a DANTt. A zöld nyilak az aktiváció, a piros nyíl a gátlást mutatja. A kettős piros nyilak azt mutatják, hogy ezek a területek felváltva, egymást kizárva aktívak.

Vannak aztán hálózatok, melyeket bizonyos határozott ingerek vagy mentális állapotok kapcsolnak be. Ezek között lehetnek kölcsönhatások, aktiválódhatnak egyszerre is. Például egy érzelmileg színezett látvány egyszerre kapcsolhatja be a vizuális és a limbikus hálózatot is.

Limbikus hálózat
Funkció: Érzelemfeldolgozás, memória, motiváció
Főbb struktúrák: amigdala, hippokampusz, orbitofrontális kéreg, anterior cinguláris kéreg



Három speciális hálózat a nyelvi (LN), a sensori-motor (érző-mozgató, SMN) és a látó (VN) elhelyezkedése és kapcsolódása (vagy épp nem kapcsolódása) az alapértelmezett (DMN), kontroll (FPN), és figyelmi (VAN, DAN) hálózatokhoz.

Sensorimotor hálózat
Funkció: Szenzoros feldolgozás, mozgástervezés és kivitelezés
Főbb régiók: elsődleges motoros kéreg (M1), elsődleges szenzoros kéreg (S1), premotoros kéreg

Vizuális hálózat
Funkció: Látásfeldolgozás, vizuális figyelem
Főbb régiók: elsődleges látókéreg (V1), látó asszociációs területek (V2–V5)

Nyelvi hálózat
Funkció: Nyelvi megértés, beszédprodukció
Főbb régiók: Broca-terület (inferior frontális gyrus), Wernicke-terület (posterior temporális lebeny), angularis és supramarginalis tekervény, elsődleges hallókéreg.
Aktiválódhat. ha valaki beszél hozzánk, mi beszélünk, írunk-olvasunk, belső monológra, kommunikációs célú gondolkodáskor, nyelvtani szabályok szabályokat vagy a nyelvi munkamemóriát használjuk.

Ezek a hálózatok nem elszigetelten működnek, hanem dinamikus kölcsönhatásban. Pl. az SN

érzékeli mi fontos, és átadja a munkát a figyelmi (VAN vagy DAN) vagy végrehajtó (FPCN) hálózatoknak. A DMN kikapcsolódik, amikor az FPCN hálózat aktív. És valószínűleg akad még olyan eset, amikor az itt felsoroltakon kívül más hálózatokba is szerveződhetnek agykérgi területek.

Láttuk a szereplőket. A következőkben megnézzük hogyan hatnak kölcsön, és ki a rendező, aki a színre hívja őket?

Az agyi területek összhangjának és működési módjainak összehangolása I: a homloklebeny, mint a tudatosság központja

Visszatérünk az agysétához, amiben legutóbb az agy pillanatról-pillanatra változó funkcionális hálózatait mutattuk be, melyekben a feladat függvényében, más-más összekapcsolt agyterületek vesznek részt.

Felmerül a kérdés: De mi szervezi meg, hogy egy-egy esetben, egy inger érkezésekor, egy feladat megoldásakor, a különböző agyi területek más-más hálózatokban és megfelelő időzítésben működjenek együtt?
Minden jel arra mutat ebben a homloklebenynek, a kéreg alatti területeknek, illetve ezek együttműködésének van szerepe.

Két dolgot kell megszervezniük:

1) mely agyterületek legyenek bekapcsolva, és

2) milyen időzítésben váltsanak a működési módok között, hogy hatékonyan tudjanak kommunikálni. Erről szól az elkövetkező néhány bejegyzés.

Az agyműködés szervezésének megértésében számomra Stanislas Dehaene francia neuropszichológus kísérleti eredményeinek megismerése megvilágosodás-szerű élményt nyújtott. Úgy éreztem az idegsejtektől a tudatosságig vezető útvonal hiányzó viaduktját állította fel. Összekötötte az általam tanulmányozott és valamelyest ismert idegsejt-kishálózatok szintjét a meta-hálózatok (agykérgi területek) dinamikájával. Többek között ennek az élménynek a hatására kezdtem el írni a blogot, hogy el tudjam mesélni az érdeklődőknek, hogyan alkotnak az idegsejtek gondolkodó agyat.



Az agy szerveződési szintjeit összekötő viaduktot megfelelően promptolt AI-val rajzoltattam. A bal parton a bottom-up megközelítés idegsejtjei és kishálózatai, a jobb parton a top-down megközeljtés funkcionális agyi hálózatai és a tudat dinamikája tűnik fel. Ilyenkor kié a copyright? Az enyém vagy az AI-jé?

Dehaene az „inattentonal blindness”, azaz a „figyelemi vakság” jelenségét vizsgálta munkatársaival: **Miért nem látunk gyakran egyértelmű, szemünk előtt levő dolgokat?**

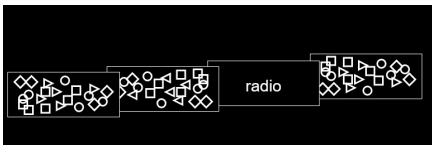
> A jelenségre egy jól ismert példa a „láthatatlan gorilla esete”. Ez egy híres 1999-es kísérlet, mely a YouTube-on is megtalálható. És itt lehet róla bővebben olvasni. A kísérletben a kutatók egy rövid, kosárlabdázó emberekről készült videofelvételt vetítettek le a résztvevőknek. A feladat az volt, hogy számolják össze, hány passzt hajtanak végre a fehér ruhába öltözött játékosok. A felvétel felénél egy gorillajelmezbe



A kép közepén jól kivehető egy gorilla jelmezbe öltözött alak. A kísérleti alanyok még sem vették észre, mert épp rettenetesen figyeltek arra hanyadszor passzolnak a fehér ruhások.

öltözött alak vonult át a játéktéren, és még egy rövid táncot is lejtett. Amikor a videó után megkérdezték az embereket láttak-e valami furcsát, a résztvevőknek több mint fele nem vett észre semmit. A gorillát észre sem vették, annyira a számolásra koncentráltak. Amikor újra megnézették velük a videót megdöbbenve vették észre a gorillát. Az első alkalommal figyelmük teljesen más irányba irányította észlelésüket és tudatukat.

Dehaeneék „inattentional blindeness"-t vizsgáló kísérlete érthetően egyszerű, bár komoly technológia szükséges hozzá (fMRI és/vagy sokcsatornás EEG). Arra voltak kíváncsiak, **mi a különbség az agy működéseben akkor, amikor egy inger tudatosodik, szemben azzal amikor nem tudatosodik?** Létezik egy jelenség, ami könnyen előidézhető. Ha valakinek mutatunk egy tárgyat, meg tudja mondani mi az. Ha egyre rövidebb időre villantunk fel neki valamit, akkor eljön az a pillanat, hogy nem biztos, hogy meg tudja mondani mit látott. Dehaene erre a jelenségre alapuló kísérlete a következőképpen zajlott. Kísérleti alanyokat, akiknek az agyműködését fMRI-vel vagy sokcsatornás EEG-vel mérte, leültetett egy monitor elé, amelyen nem látszott semmi (csak fehér képernyő vagy zaj). Kis várakozás után egy rövid időre felvillantott egy képet, majd újra az üres képernyőre kapcsolt. Ha a kísérleti alany látni vélt valamit, akkor meg kellett nyomnia egy gombot. A felvillantás idejét változtatva elérhető, hogy minden alany az esetek felében lássa a tárgyat, felében ne.



A kísérlet során gyors egymásutánban felvillantott képek. Két gyors zajos képet követ, itt egy szó, melyet gyorsan eltakar egy újabb zajos kép.

A kérdés itt: Mi az, hogy látja?

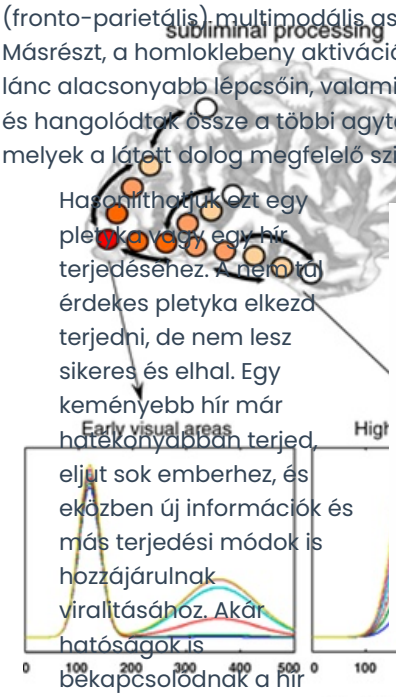
Fizikailag minden esetben megjelent a kép, de agyában annak látványa nem mindig tudatosodott. Jónéhány ismétlés után a kutatók összeátlagolták az agyműködés alakulását a látta és a nem látta esetekben. Erre ugye azért van szükség, mert pl. az fMRI viszonylag lassú, másrészt -mint épp most, a funkcionális hálózatoknál írtuk- az agynak vannak belső, a felvillant képektől független állapotváltozásai is. Ezek zavaró hatását sok kísérlet átlagolásával el lehet tüntetni.

Mi volt az az érdekes jelenség, amit Dehaene-ék láttak?

Azt mérték, hogy függetlenül attól, hogy az alany látta-e a képet vagy nem, a felvillantást követően az elsődleges látókéregben elkezdett felépülni egy aktivitás, mely tovaterjedt a látórendszeren, követve azt az agykéreg területről agykéreg területre ugráló hierarchikus feldolgozási láncot, amit a percepcióról szóló bejegyzésekben bemutattam. Az első 300msec-ben (a másodperc harmada) a feldolgozás már viszonylag magas szinten állt, aktiválódtak a Hol? és a Micsoda? feldolgozására szakosodott másodlagos és látó asszociációs területek.

Viszont! 300msec-nél több idő eltelte után a két esetben teljesen eltérő módon változott tovább az agy aktivitása. Amikor az alany nem érzékelte a képet, az nem tudatosodott, az agyi aktivitás elkezdett csökkeni, majd elhalt. Abban az esetben amikor tudatosodott benne, hogy lát valamit, az agyi aktivitás még további 300-500msec-ig (összesen közel egy másodperc) tovább növekedett. Egyrészt, tovább terjedt a feldolgozási láncon előre a

(fronto-parietális) multimodális asszociációs kérgi területek, majd a homloklebeny felé. Másrészt, a homloklebeny aktivációját követően megerősödött az aktivitás a feldolgozási lánc alacsonyabb lépcsőin, valamint újabb, magasabb rendű agyterületek kapcsoltak be és hangolódtak össze a többi agyterülettel. Beindultak a top-down hatású visszacsatolások, melyek a látott dolog megfelelő szintű modelljeit aktiválták szerte az agykéregben.



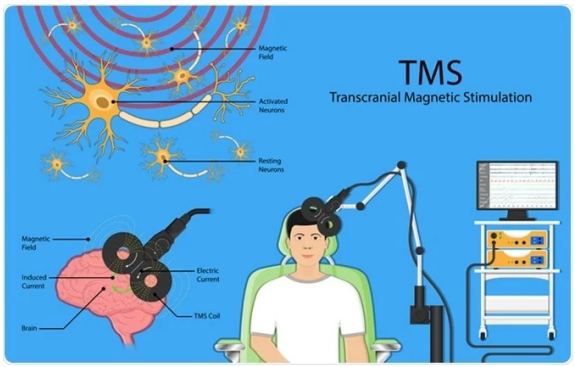
A Dehaene kísérlet eredménye. A felső bal és jobb ábra azt mutatja meddig jut el az információ feldolgozása a kérgi hierarchián a nem-tudatosodó és tudatosodó állapotokban. Nem tudatosodó esetben csak a látókérgi feldolgozási láncon szalad végig, majd elhal. Tudatosodó esetben, a látókéreg feldolgozási láncán kívül, a homloklebeny alsó (ventrális) területei is bekapcsolódnak a feldolgozásba. Ezek a területek a tudatosodó esetben mutatott aktivitás kialakításában játszanak szerepet. Az alsó ábrák azt mutatják, hogy a homloklebeny aktivitása viszont csak a tudatosodó esetekben aktív. A látó asszociációs területeken az elsődleges csúcsot egy másodlagos követi, mely homloklebenyből érkező visszacsatolt aktiváció hatására jelenik meg.

Hasonlíthatjuk-ezt egy pletyka vagy egy hír terjedéséhez. A nemtől érdekes pletyka elkezd terjedni, de nem lesz sikeres és elhal. Egy keményebb hír már hatékonyabban terjed, eljut sok emberhez, és ekközben új információk és más terjedési módok is hozzájárulnak viralitásához. Akár hatóságok is bekapcsolódnak a hír hatásának kezelésébe. Bekerül a társadalom tudatosságába.



A rosszul és jól terjedő pletyka esete bemutatja a 'gyújtás' jelenséget, mely fontos a tudatosodásban..

Úgy tűnik, összefüggés van a között, hogy a kísérleti alanyok tudatos érzékelésről számoltak be, valamint, hogy a homloklebeny aktivációja bekövetkezett. Ez jó összhangot közelítés. De, mint tudjuk, nagyon nagy hiba összekeverni az összefüggést (korrelációt) az oksággal (kauzalitás). Ha két dolog együtt változik, annak lehet akár közös oka is, nem pedig ok okozati összefüggés a két dolog között. Nos ennek is utánajártak az alapos kutatók.



A Transcranial Magnetic Stimulation módszer esetében a koponya felszínén létrehozott gyorsan változó mágneses tér áramot indukál az idegsejtekben, és ezzel megzavarja azok működését. Megfelelő helyen elhelyezett mágnessel pontos időzítéssel kapcsolhatók ki célzott agyterületek.

Létezik egy módszer: TMS-nek, Transcranial Magnetic Stimulation-nek, azaz Koponyán Keresztüli Mágneses Ingerlésnek hívják. Itt egy igen erős elektromágnest helyeznek el a koponya felszínén, a vizsgálni kívánt agykérgi terület fölé. Ha a mágnest egy pillanatra bekapcsolják, annak változó mágneses tere áramokat kelt az idegsejtekben, ezzel megzavarja az agykéreg információfeldolgozását és így pontos időzítéssel ki lehet kapcsolni egyes agyterületeket. Nos a kutatók egy ilyen mágnest helyeztek el a kísérleti alanyok homloklebenye fölé. Ha 300msec-el a kép felvillantása után bekapcsolták a mágnest, akkor képesek voltak megakadályozni, hogy a kísérleti alanyok agyában tudatosodjon, amit láttak és nem alakult ki további növekedett és összehangolt aktivitás. Máskor használva a mágnest nem figyeltek meg ilyen hatást. Tehát, ha a megfelelő pillanatban kiiktatták a homloklebenyt, akkor a 300msec-et követő időben nem fejlődött tovább az agy aktivitása, és nem kapcsolódtak be további területek az inger feldolgozásába, az inger nem tudatosodott. Ez már az okság bizonyítéka, a homloklebeny felelős a tovább növekedő, összehangolt aktivitásért.

A kísérletből több, meglehetősen nagyhatású, talán merésznek tekinthető következtetést

lehet levonni:

1) **A homloklebeny működése szükséges a tudatosság kialakulásához.** A homloklebeny irányítja, hogy a megfelelő agyterületek működése pontosan, pillanatról pillanatra legyen összehangolva.
2) **Viszonylag bonyolult feldolgozás történik még akkor is, amikor az inger nem tudatosodik.** Úgy tűnik Freudnak igaza volt, létezik tudat alatti, olyan agyi folyamat, mely nem tudatosodik, de befolyásolja döntéseinket. Bár a pontosság kedvéért meg kell jegyezzük, a Freudi tudatalatti nem teljesen fedi a nem-tudatosodó agyi folyamatokat, amikről itt beszéltünk.
3) Ennek aztán komoly filozófiai és jogi vonzatai lehetnek. Lásd a „szabad akarat" és a „felelősek vagyunk-e a tetteinkért?" kérdésköröket. Ezekbe majd később megpróbálom beleütni az orromat.

A tudattalan, de gyors feldolgozást kihasználó technológia használatával kísérletezett az amerikai hadsereg (Neuro-adaptive image triage avagy EEG-alapú gyors képfeldolgozás), még mielőtt Dehaene elvégezte volna kísérleteit vagy az AI forradalom megindult volna. A robotrepülőkről és műholdakról hatalmas mennyiségű fénykép érkezett, melyeket szakembereknek kellet feldolgozna, látszik-e rajtuk valami katonailag fontos dolog. A képernyők előtt ülő szakembereknek több ezer képet kellett megnézniük naponta. Ez egy lassú folyamat. Rájöttek arra, hogy amikor valami keresett dolog van a képen, akkor már a látásfeldolgozás viszonylag alacsony szintjén álló, gyorsan aktiválódó agyterületekről elvezethető egy EEG jel, mely potenciális találatot jelez. Az ezt használó módszer lényege, hogy gyakorlatilag észlelhetetlen sebességgel pergetik a képeket a szakembereknek, és amikor az EEG mutat egy találatot, akkor azt a képet megállítják és megvárják, hogy a tudatos feldolgozás is megtörténjen, tényleg valami fontos van-e a képen. Így jelentősen lehet gyorsítani a képek böngészését. Bár, hogy őszinte legyek nem lennék ilyen kísérleti nyúl. Ki tudja mekkora fejfájást kaphat valaki, ha órák hosszat nagy sebességgel látszólag értelmezhetetlen képek pörögnek a szeme előtt.



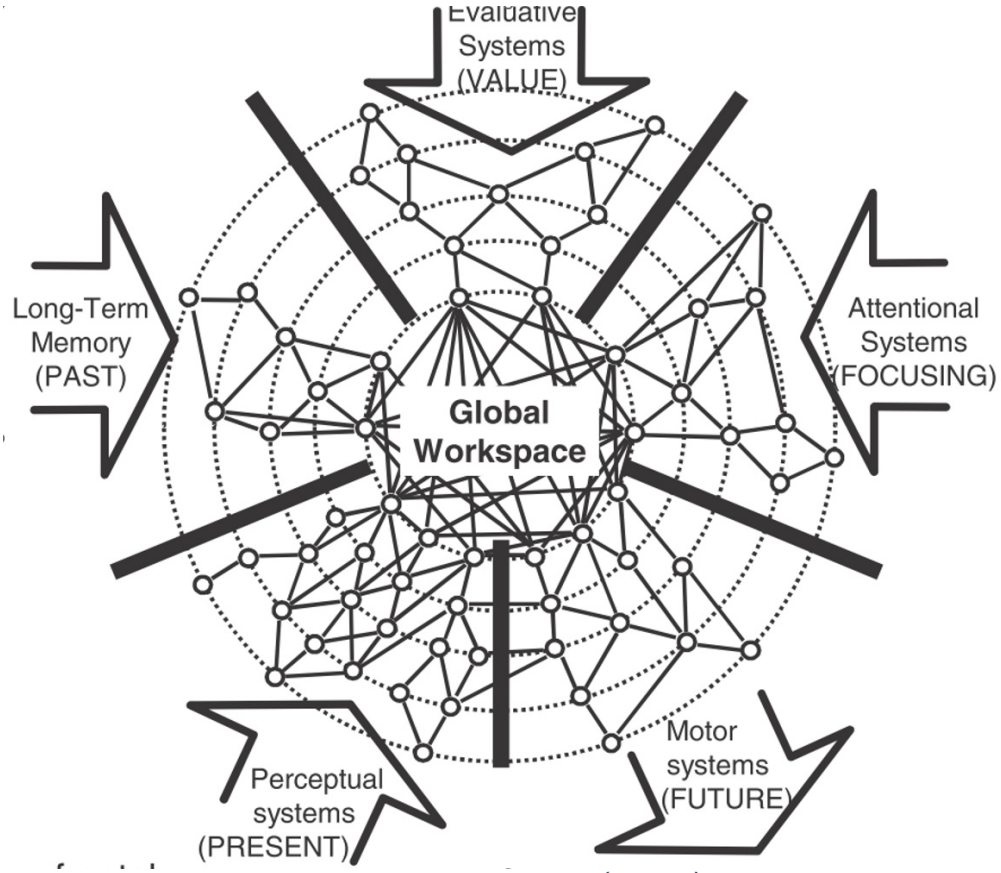
Katonai szakértő drón és műhold képeken keresi a váratlan dolgokat. Ma már ezt valószínűleg AI csinálja. Ha tetszik, ha nem.

Hogy a kísérlet eredményeiről milyen következtetéseket lehet levonni a tudat kialakulásával kapcsolatban, azt a következő bejegyzés mutatja be.

Szerző: **Gulyás Attila**

A tudatosság kialakulásának egyik modellje: a Global Neuronal Workspace Theory

Mit adtak hozzá az előző bejegyzésben tárgyalt eredmények a tudatelmélethez? Kísérleti eredményei alapján Dehaene, mentorával Jean-Pierre Changeux-vel módosította Bernard Baars megismeréskutató 1988-as Global Workspace Theory modelljét és megalkották a tudatosság Global Neuronal Worspace (Általános Idegi Munkatér, GNW) modelljével.



A GNWbe kapcsolódó agyi rendszerek. A perceptuális (érzékelő) rendszerek és a kiértékelő rendszerek a JELENRŐL szolgáltatnak információt, a figyelmi rendszerek fókuszt adnak, a memória rendszerek a MÚLT tapasztalatait (mit tudok, ki vagyok) adják hozzá a tudatállapothoz és ennek alapján a motoros/tervező rendszer a fenti megfelelő kontextusban dönt, határozza meg a JÖVŐt.

Ez azt mondja ki, hogy bár az **agy moduljaiban automatikusan megtörténik egy viszonylag magasszintű, párhuzamos feldolgozás, ahhoz, hogy valami tudatosodjon, szükség van arra, hogy a homloklebeny együttműködő hálózatba szervezze az aktuális helyzet vagy feladat megoldásához szükséges agyterületeket.** A homloklebeny kialakítja a GNW-t, amire minden bevont terület eljuttatja a maga információját (az aktuális objektum belső modelljének elemeit) és mindenki - aki részt vesz az együttműködésben - hozzáfér ehhez.

> Meg kell jegyezzem, hogy léteznek más tudatmodellek is, mint például az Integrated Information Theory (IIT). Mostanában épp komoly viták folytak, vajon az IIT-t vagy a GNW teóriát támasztják alá jobban kísérleti eredmények. 2025 nyarán épp az IIT állt nyerésre, de míg a GNW-t inkább megismeréskutatók alapozták meg, addig az IIT-t fizikusok.
>
> $$\mathrm{ii}(s, \tilde{s}) = p(\tilde{s} \mid s) \log_2 \left(\frac{p(\tilde{s} \mid s)}{p(\tilde{s})} \right)$$
>
> *A tudat fizikus módra.*
>
> A magam részéről nem sikerült az IIT gondolatmenetét és matematikáját megértenem, viszont a GNW részletei szépen simulnak bele abba a keretbe, amit én ismerek, és valamelyest értek. Más kutatók (Koch, Tononi) a Posterior hot zone, azaz hátsó forró zóna elképzelést részesítik előnyben. Ugyanis vannak olyan homloklebeny léziós betegek, akiknek a perceptuális tudata megmarad. Amit biztonsággal mondhatunk, hogy a tudatos percepció gyakran együtt jár egy kiterjedt fronto-parietális hálózat aktivációval, amely valószínűleg az információ globális hozzáférhetőségét és viselkedéses felhasználását segíti.

Én itt most a továbbiakban a GNW-t és annak folyományait boncolgatom, mert jól

bemutatja hogyan szerveződik a tudatosság az agyi rendszerek dinamikus kapcsolódása során. De felhívom az olvasók figyelmét, hogy ne hagyjanak figyelmen kívül más lehetséges elméletet sem.

Mit állít a GNW és mik az állítások folyományai?

A GNW azt próbálja megmagyarázni, hogyan válik egy mentális tartalom tudatossá az agyban. Lényege egyszerűen: Az agy számos modulja (látás, hallás, emlékezet stb.) párhuzamosan dolgozik, de ezek legtöbbször nem alkotnak tudatos élményt. Amikor egy adott információ elég erőssé, érdekessé, meglepővé válik, hogy aktiválja a globális „munkateret" (GNW), akkor széles körben hozzáférhetővé válik más agyterületek számára is, hozzáfér egy alaposabb, kiterjedtebb feldolgozáshoz, így tudatossá válik. Ez a „globális munkatér" tehát egyfajta információs elosztó központ, ami lehetővé teszi, hogy egy adott mentális reprezentációt sokféle más rendszer (figyelem, emlékezet, beszéd, döntéshozás) is elérjen és használjon. Hasonlíthatnánk egy a pénz kialakulása előtti vásárhoz, ahova mindenki elvitte a termékeit, mert hatékonyabban lehet csereberélni, mint amikor kettesével találkoznak az emberek.



A pénz használata előtti időkben a piacon összegyűlt mindenki, elhozta amije van, és azt csereberélgették egymással. Búzáért kocsikereket, húsért agyagedényt lehetett szerezni. A GNW-be is bedobja a feledatmegoldásban fontos összes agyterület amit tud, és ebből alakul ki egy megolás.

Fő elvei és kulcselemei:

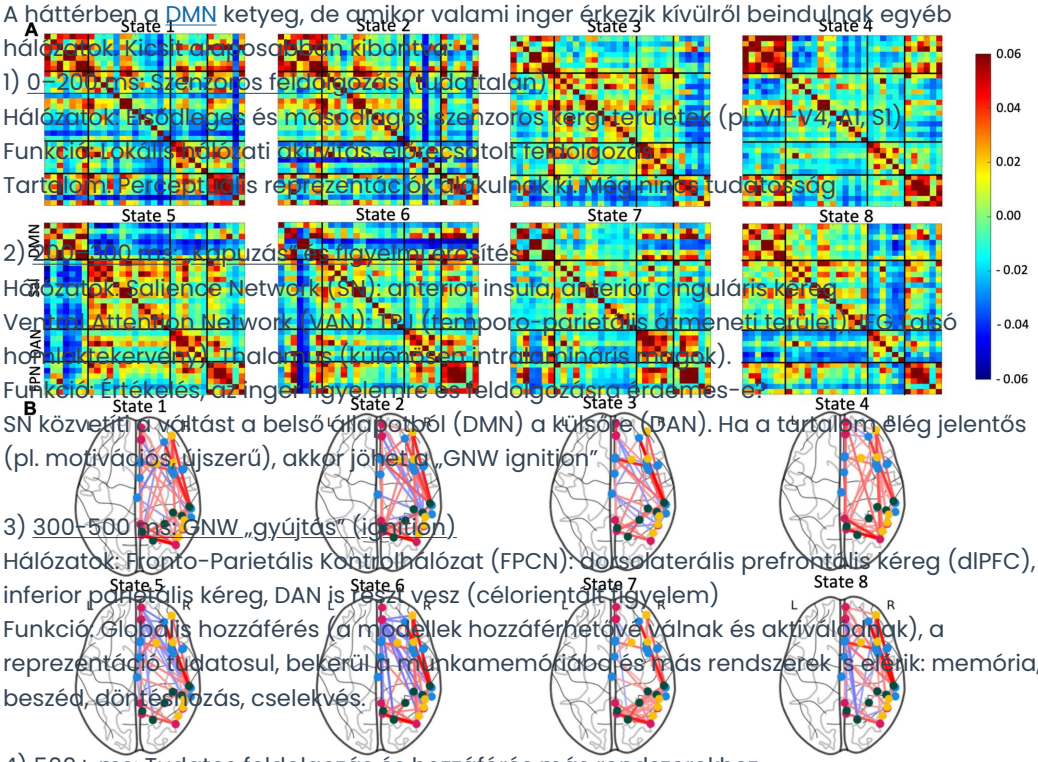
- Moduláris feldolgozás: Az agy és agykéreg alsóbb rendszerei (pl. vizuális kérgek, hallókérgek, testérző kérgek és ezek multimodális változatai) sok információt dolgoznak fel viszonylag magas szinten tudattalanul.
- A tudatossá válás feltétele: Az információ „áttör" a GNW-be, ha figyelmet kap, erős, konzisztens és jelentős. Ezt a pillanatot hívják gyújtásnak (ignition).
- Globális elosztás: A GNW aktiválódása után az információ hirtelen elérhető lesz a bevont területek számára. A hierarchikus, különböző agykérgi területeken kialakult modellek összeadják, amit tudnak a dologról.
- Legfontosabb ebben a fronto-parietális hálózat: A GNW fizikai alapját főként a dorsolaterális prefrontális kéreg, az anterior cinguláris kéreg, a parietális lebeny és a talamusz adja.
- A tudatos tartalom összehangolja a különböző agyi rendszereket, lehetővé téve a döntéshozást, tervezést, verbalizációt (nyelvi megfogalmazást-beszédet), stb..

Nézhetjük az eseményeket az agyi funkcionális hálózatok aktiválódásának keretében is:

Idő (ms)	Domináns hálózatok	Funkció
0–200	Szenzoros hálózatok	Automatikus feldolgozás
200–300	SN, VAN, thalamus	Salience detektálás, figyelmi kapu
300–500	FPCN, DAN	GNW „gyújtás/ignition", globális aktiváció
500+	FPCN, nyelvi, memória, motoros, stb. hálózatok	Tudatos hozzáférés és cselekvés

A háttérben a DMN ketyeg, de amikor valami inger érkezik kívülről beindulnak egyéb hálózatok. Kicsit alaposabban kibontva:

1) 0–200 ms: Szenzoros feldolgozás (tudattalan)
Hálózatok: Elsődleges és másodlagos szenzoros kérgi területek (pl. V1–V4, A1, S1)
Funkció: Lokális hálózati aktivitás, előfeldolgozás
Tartalom: Percepciós reprezentációk alakulnak ki. Még nincs tudatosság



Állandóról változó kölcsönható hálózatok: A felső rész az egyes agyterületek közötti kapcsolatok erősségét (színnel) és irányát (nyíllal) mutatja. Alul az erősebb kapcsolatok vizuális reprezentációja látható.

2) 200–300 ms: Kapuzás és figyelem érvényesítés
Hálózatok: Salience Network (SN): anterior insula, anterior cinguláris kéreg
Ventral Attention Network (VAN): TPJ (temporo-parietális átmeneti terület), IFG (alsó homloklebeny), Thalamus (különösen intralaminális magok).
Funkció: Értékelés, az inger figyelemre és feldolgozásra érdemes-e?
SN közvetíti a váltást a belső állapotból (DMN) a külsőre (DAN). Ha a tartalom elég jelentős (pl. motivációs, újszerű), akkor jöhet a „GNW ignition”

3) 300–500 ms: GNW „gyújtás” (ignition)
Hálózatok: Fronto-Parietális Kontrollhálózat (FPCN): dorsolaterális prefrontális kéreg (dlPFC), inferior parietális kéreg, DAN is részt vesz (célorientált figyelem)
Funkció: Globális hozzáférés (a modellek hozzáférhetővé válnak és aktiválódnak), a reprezentáció tudatosul, bekerül a munkamemóriába és más rendszerek is elérik: memória, beszéd, döntéshozás, cselekvés.

4) 500+ ms: Tudatos feldolgozás és hozzáférés más rendszerekhez
Hálózatok: FPCN tovább aktív, Nyelvi hálózat, munkamemória rendszer, premotor/motoros kérgek, hippocampus (ha konszolidáció/memória kialakulás indul).
Funkció: Verbális kimondás, döntés, tudatos munkamemória, emlékezés, cselekvés előkészítés
Különbség: Ha nincs GNW-aktiváció az inger „elhal”, nincs emlék, nincs tudatosság

Mi történik, ha nincs szikra (ignition)?
Ha az inger gyenge, zavaró ingerekkel versenyez, vagy nem kap figyelmet, akkor csak a korai szenzoros aktivitás (és valamilyen szintű automatikus, készségszerű nem tudatos feldolgozás) jelenik meg, az inger tudattalan marad, nem tárolódik, nem megfogalmazható.

A GNW a tudattal kapcsolatos számos jelenségre próbál magyarázatot adni:
- Miért tudunk néhány dolgot tudatosan megtartani, míg másokat nem?
- Miért egy dolgot tudunk hatékonyan tudatosítani?
- Miért korlátozott a tudatosság kapacitása?
- Miért fontos a figyelem és munkamemória a tudatosság kialakulásához?

De miért is?
Az agyunkban folyó folyamatok versengenek egymással, hogy az GNW-be (tudatosságba) kerüljenek. Csak azok kerülnek be, amik kellően jelentősek, fontosak (salient). Azáltal, hogy bekerülnek (a SN aktiválja a FPCN-t), az agy feldolgozása arra az egy irányra fókuszál. A probléma megoldásához GNW lehetőséget biztosít az összes elérhető erőforráshoz való hozzáféréshez. Lásd a harmadik rész végén bemutatott zsiráfos példát: a zsiráf képe számos agyterületen aktiválja a hozzá kapcsolódó eltérő szintű modelleket, amik mindent bedobnak amit tudukn a zsiráfról. Azonban amikor valami a GNW-be kerül, más problémák feldolgozásának helyben és elszigetelten kell maradni, nem férnek hozzá az agy nagy területeihez és erőforrásaihoz, vagy akár fel sem dolgozza őket az agy.
Éppen ezért az GNW-be kerülni luxus! Az agynak jól meg kell válogatnia, mit enged oda be, mert ha valami fontosat kizár, annak komoly következményei lesznek. Amit beengedtünk megmarad, de mással nem tudunk ilyen részletekben foglalkozni. Van, amit nem engedünk be, azt észre se vesszük, mert elbukott a figyelemért folyó versenyben (mint a gorillaruhás ember a passzok számolása miatt).
De mik azok az erőforrások, amikhez hozzáfér a GNW-be került inger/feladat/gondolat? Az

érzékszervek feldolgozott információi bemutatják a JELENt. A hosszútávú memóriából a MÚLTban tanultak csatlakoznak hozzá. A kiértékelő rendszerek jelentik a dolog ÉRTÉKét, fontosságát. A FIGYELEM pedig kiválasztja melyik irányba fókuszáljunk. Ezek összegzéséből születik meg az aktiválódott modellek segítségével a GNW-ben a terv, a mozgás, a válasz, azaz a JÖVŐ.

Mindezek alapján (egy bátor lépéssel) egyenlőséget tehetünk a GWN tartalma és a tudatos tartalom között. Aki már meditált és rendszeresen megfigyeli tudattartalmát, az tapasztalhatta, hogy az pillanatról pillanatra változik (lásd a funkcionális hálózatok váltakozását). A körülöttünk és bennünk történő dolgokat, rövid időtávon sosem teljességében éljük át, hanem tudattartalmunk pillanatról pillanatra változik, figyelmünkkel együtt vándorol, hogy belülre, kívülre vagy egy problémára figyelünk. Attól függően éppen mi kerül be GNW-nkbe.



A gyakorló meditáló meg tudja figyelni tudatának pillanatról-pillanatra változó tartalmát. Nem csak a meditáció alatt, hanem a mindennapi életben is. Nem egy 'rocket science', egy kis gyakorlással te is megfigyelhete épp mi zalik a fejedben és terelgetheted a jó irányba.

Azért felmerül egy praktikus mérnöki probléma. Milyen módon éri el a homloklebeny, hogy a megfelelő agyterületek összekapcsolódjanak egymással? Erről lesz szó a továbbiakban.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az agyi területek működési módjainak összehangolása II: a kéreg alatti modulációs központok szerepe

A GNW kísérleti megalapozását már áttekintettük, és nagyjából értjük a tudattartalmak dinamikáját. A kérdés azonban továbbra is nyitott: Hogyan képes a homloklebeny más agyterületeket — elsősorban az agykérget — összehangolt működésű hálózatokba szervezni?
Az anatómiai kapcsolatok alapján legalább három lehetséges „meghívó" útvonal rajzolódik ki:

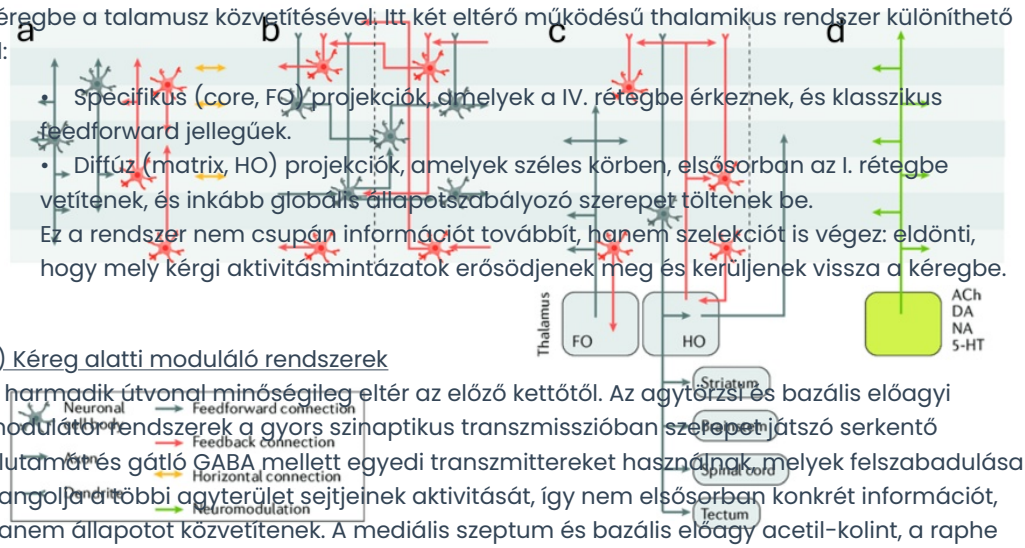
1) Kéreg–kéreg (cortico-corticalis) kapcsolatok
Az agykérgi területek között kiterjedt, hosszú távú serkentő pályák futnak, melyek nagy mennyiségű információt továbbítanak. Ezek két alapvető irányt követnek:

- Feedforward kapcsolatok: főként a II–III. rétegből indulnak, és a célterületek IV. rétegében végződnek. Ezek közvetítik az alacsonyabb szintről magasabb szintre haladó információt.
- Feedback kapcsolatok: jellemzően az V–VI. rétegből indulnak, és a célterületek I. és VI. rétegében végződnek. Ezek top-down hatásokat közvetítenek.

Ez a kettős rendszer teszi lehetővé, hogy a magasabb rendű területek ne csak „olvassák", hanem aktívan alakítsák is az alacsonyabb szintű feldolgozást — például a releváns modell kiválasztásán keresztül.

2) Kéreg–bazális ganglion–talamusz hurkok

A kéregből induló jelek a striátumon és a bazális ganglionokon keresztül jutnak vissza a kéregbe a talamusz közvetítésével. Itt két eltérő működésű thalamikus rendszer különíthető el:



- Specifikus (core, FO) projekciók, amelyek a IV. rétegbe érkeznek, és klasszikus feedforward jellegűek.
- Diffúz (matrix, HO) projekciók, amelyek széles körben, elsősorban az I. rétegbe vetítenek, és inkább globális állapotszabályozó szerepet töltenek be.

Ez a rendszer nem csupán információt továbbít, hanem szelekciót is végez: eldönti, hogy mely kérgi aktivitásmintázatok erősödjenek meg és kerüljenek vissza a kéregbe.

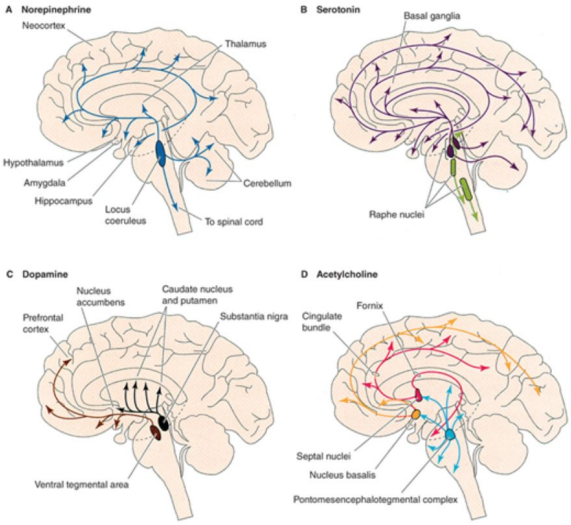
3) Kéreg alatti moduláló rendszerek

A harmadik útvonal minőségileg eltér az előző kettőtől. Az agytörzsi és bazális előagyi modulátor rendszerek a gyors szinaptikus transzmisszióban szerepet játszó serkentő glutamát és gátló GABA mellett egyedi transzmittereket használnak, melyek felszabadulása hangolja a többi agyterület sejtjeinek aktivitását, így nem elsősorban konkrét információt, hanem állapotot közvetítenek. A mediális szeptum és bazális előagy acetil-kolint, a raphe magvak szerotonint, a locus coeruleus noradrenalint, a substancia nigra és ventral tegmentális terület dopamint, ha tisztán illáris meg pedig hisztamint használ, hogy:

Gőre- és visszacsatoló kapcsolatok, valamint neuromodulációs bemenetek az agykéregben. Az alsó szöveg megfelelően használ, a rendszer fenntartásban a hatásban.

- szabályozzák a neuronok ingerlékenységét,
- befolyásolják a jel–zaj viszonyt,
- módosítják a szinaptikus hatékonyságot,
- és kulcsszerepet játszanak a tanulásban.

Fontos hangsúlyozni, hogy nem pusztán lassú, diffúz hatásokról van szó. A modulátor rendszerek tonikus és fázisos komponensekkel is működnek: képesek gyors, időben pontos jelzésekre (például dopamin alapú predikciós hibák), miközben hosszabb időskálán is hangolják az agyi állapotokat. Károsodásuk súlyos tudatzavarhoz vezethet (csökkent, beszűkölt tudatállapot, tudatvesztés), ami arra utal, hogy ezek a rendszerek szükséges feltételei a tudatos működésnek — még ha a konkrét tartalmat nem is ők hozzák létre.



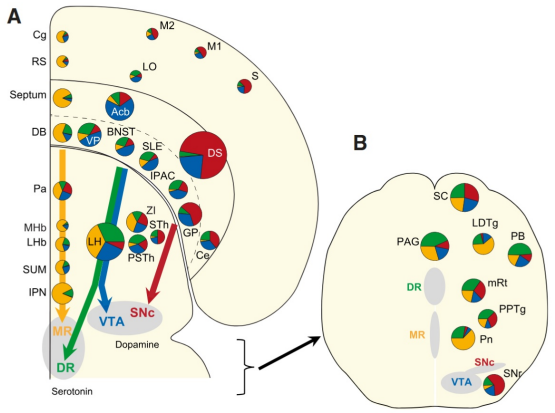
A négy legfontosabb kéreg alatti moduláló központ elhelyezkedése és vetítési mintázatai. Az egyedi ingerületátviú anyagokat használó területek az egész agykérget behálózzák és hangolják annak működését.

Ezek a moduláló központok (MK a továbbiakban) az evolúció során korán kialakult ősi agyterületeken találhatók, és a kezdetektől részt vettek a szervezet belső állapotai által meghatározott igények alapján az agyműködés hangolásában. Ahogy kialakult és bonyolódott az agykéreg, az MK-k kérgi vetítéseik útján rajta tartották a kezüket, hogy működését a szervezet és a környezet igényeinek megfelelően hangolják, ne hagyják a fellegekben szárnyalni, mert abba bele lehet halni. Így meghatározóvá váltak a külső környezet és a belső állapotok változását követő állapotátmentek hangolásában, a figyelemben, az éberségben, az alvás-ébrenléti ciklus szabályozásába és a motivációban.

De miért és hogyan meghatározók az MK-k a tudathoz szükséges dinamikus agykérgi hálózati kölcsönhatások kialakításában?

Korábban amellett érveltem, hogy egy idegi hálózat nem képes egyszerre minden feladatot optimálisan ellátni. Egy agykérgi területnek időben váltogatnia kell különböző működési

módokat — például információ fogadása, feldolgozása és továbbítása között. Amikor több terület működik együtt, ezeknek a váltásoknak időben összehangoltnak kell lenniük: a küldő területnek „kimeneti" állapotba kell kerülnie, a fogadónak pedig ezzel szinkronban „bemeneti" állapotba. Többek között kutatócsoportunk munkái mutatták ki (lásd a Tengericsikó meséjét), hogy a moduláló ingerületátvivő anyagokat felszabadító MK-k fontosak az agyi feldolgozási módok, és ezért az EEG állapotok közötti átkapcsolásban. Ha az MK-kból érkező jelek nem egyszerűen aktiválnak, hanem időben és térben finoman strukturált mintázatokban hangolják a kérgi területek működési módját, összerendezhetik a kéregterületeket közötti információ áramlását. Ez a gyorsan változó hangolás nyilvánul meg az EEGben összehangolt gamma, béta, theta oszcillációként. Ehhez persze az kell, hogy a moduláló bemenet az egyes célterületeket ne egyszerre kapcsolják ugyanolyan állapotba, hanem egy finom, változó mintázatban.



Az egyes agyi területek más arányban küldenek információt az eltérő szerepet betöltő MK-kba. Az egyes 'pite diagramok' azt moutatják, hogy egy adott agyterület milyen arányban és mennyi (méret) információt küld a szerotonerg median (MR, sárga) és dorsal (DR, zöld) raphéba, illetve a dopaminerg VTA (kék) és SNc (piros) magvakba. A) az agy felülnézeti, B) a középagy előnézeti képén mutatja be a küldő területek célarányait.

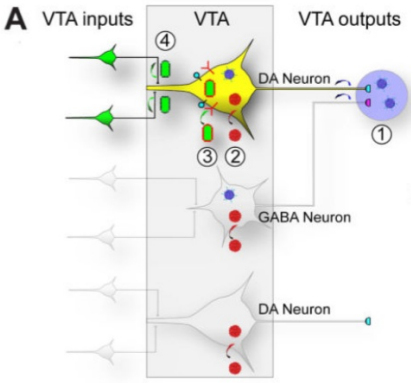
Ezt a lehetőséget támogatják a legújabb eredmények. Korábban az volt az uralkodó nézet, hogy ezek a rendszerek szétszórtan, nem specifikusan árasztják el az agyat. Az újabb eredmények ezt a képet jelentősen finomították. Ma már tudjuk, hogy: egy-egy modulátor magon belül több sejttípus létezik, ezek eltérő bemeneteket kapnak és gyakran jól körülhatárolt célterületekre vetítenek. Például a dopaminerg rendszerben a VTA egyedi neuronjai specifikus kérgi és striátális célpontokat érnek el. Hasonló szerveződés figyelhető meg a kolinerg és szerotonerg rendszerekben is. Ez a strukturáltság teszi lehetővé, hogy a különböző kérgi területek ne egyszerre, hanem finoman eltolva, mintázatban váltsanak működési módot.

Viszont amit idáig leírtunk, az egy kéreg-alatti -> agykéreg információ áramlási irány. Mindaddig, amíg a kéreg alatti területeknek csak a külvilágból és a belső testi dolgokról érkező ingerekre kell reagálni, ezzel az egyirányúsággal nem is lenne gond. De a fejlettebb agyú állatokban, ahol a cselekvés nem modell-független, hanem egy összetett belső modell irányítja (emlősök, bizonyára a madarak és valószínűleg néhány puhatestű és rák) az agykéreg (vagy az annak megfelelő terület) működését és területeinek összehangoltságát absztraktabb, csak az agykéregben (vagy azzal ekvivalens struktúrákban) kiértékelhető információk is befolyásolják.

De hogyan kerül le ez a kifinomult agykérgi információ a kéreg alatti területekre?

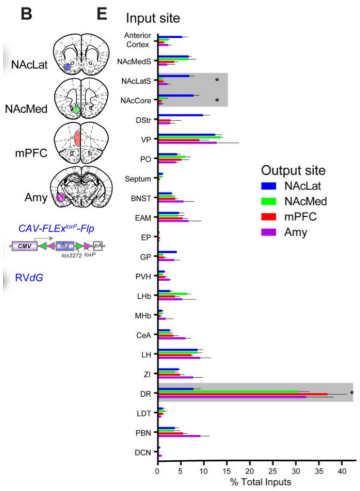
Ezt csak mostanában kezdték el megkérdezni a kutatók. A téma napjaink egyik forrongó kutatási irányává vált, melyet az tett lehetővé, hogy transzgénikus és vírus jelölési technikákat használva, lehetséges egyedi idegsejtek bemeneteinek és kimeneteinek feltérképezése. Meg tudjuk nézni azt, hogy pl. egy-egy VTA dopamin sejt, vagy a raphe magvak egyes szerotonint tartalmazó sejtjei honnan kapnak bemeneteket és hova küldik a dopamint és a szerotonint. Az agykéreg mellett, nagy erősségű (7T) fMRI -t használva elkezdték a kéreg alatti, középagyi és agytörzsi aktivitást is megvizsgálni. Itt is találtak bonyolult mintázatokat, melyek összefüggenek az agyi funkcionális hálózatok aktiválódásával.

Az eredmények szerint, a magasan absztrakt mintázatokat feldolgozó homloklebeny különböző területeiről finoman mintázott vetítéseken keresztül nagy mennyiségű információ



A tanulásban fontos VTA sejtjeibe adott vírus a sejtre érkező szinapszisokon visszfele (retrograde) terjedve megjeleníti a sejtekre bemenetet adó agyterületeken lévő sejteket. Ugyanezeket a VTA sejtek lehetséges célterületeikről szintén megfertőzhetők egy másik vírussal. Így feltérképezhető egyes sejtek esetében honnan kapnak bemenetet és hova vetítenek.

vetül a dopaminerg (VTA), a noradrenerg (LC), és a szerotonerg (raphe) rendszerek felé. Sok MK sejtet összevetve kiderült, hogy nagy különbség van az egyedi sejtek összeköttetés rendszerében. Az, hogy mely kéregterületről kap egy sejt információt, meghatározza, hogy mely területet modulál vetítései útján. A homloklebeny tehát az MK-k, pontosabban finoman kiválasztott MK sejtek útján közvetve befolyásolni képes más agykérgi területek térbeli és időbeli kölcsönhatását, információ feldolgozó módjuk időzített átkapcsolását, azaz funkcionális hálózatok időleges kialakulását.



A vírusjelöléses kísérletek kimutatták, hogy az egyes agyi területekről (grafikon bal oldalán felsorolva) bemeneteket kapó VTA dopamin sejtek más arányban adnak kimeneteket különböző agyterületekre. Az egyes területeket színessel az ábra bal oldala mutatja. Az egyes agyterületekre történő vetítések arányát a színes grafikon vonalak mutatják.

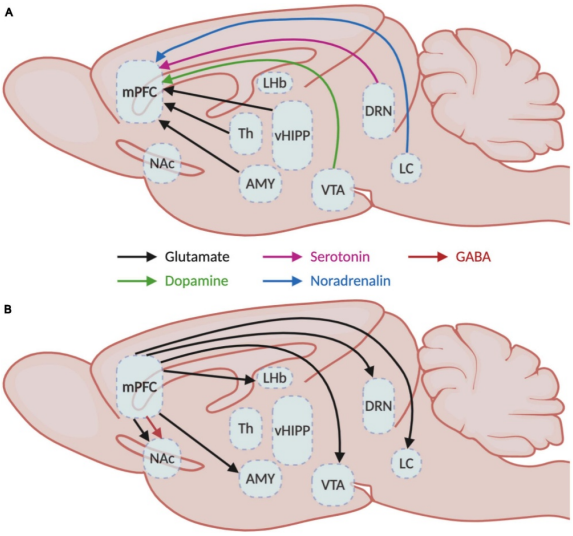
Fontos még megjegyezni, hogy a fenti három lehetséges „meghívó" útvonal nem kizárja egymást, hanem együttműködik. A reprezentációban fontos serkentő sejt mintázatok (aktiválódott modellek) az első és második útvonalon jutnak el más területekre, de ahhoz, hogy ezek a megfelelő pillanatban induljanak és érkezzenek a harmadik útvonal modulátoros hatása kapcsolja a szükséges állapotokba az aktuális funkcionális hálózatban résztvevő agyterületeket. Így jön létre a GNW-nek egy-egy pillanatnyi állapota, hálózata. Amikor egy aktuális hálózatban megszületik a megoldás, a homloklebeny annak függvényében, hogy az mi, egy újabb együttműködő hálózatot alakít ki a 3 lehetséges csatornát használva.



Egy TVn a hálózatról érkező nagy mennyiségű információ megjelenítését egy viszonylag kis információmennyiséget leadó távirnyító 'modulálja'.

Az agykérgi serkentő kapcsolatok magas információtartalmának és a moduláló központok átkapcsoló jeleinek szerepét jól lehet egy TV példájával szemléltetni. A hálózati, HDMI, és egyéb kábeleken érkezik az a rengeteg információ, hogy melyik műsort lehet megjeleníteni, de hogy be van-e kapcsolva a TV, melyik csatorna szól, és milyen hangosan, azt már a távirányítóból érkező viszonylag csekély mennyiségű információt hordozó jelek befolyásolják.

A modern agyevolúció során tehát a homloklebeny „rátalált" az MK-kra és segítségül hívta őket az agyműködés szabályozásához. A moduláló rendszerek így már nem csak a test és a külvilág felől kapnak irányító bemeneteket, hanem a belső modellek, célok és döntési folyamatok is közvetlenül befolyásolják, hogy az MK-k mikor, hol és milyen mintázatban fejtik ki hatásukat. Egy (újabb) zárt hurok jött létre: a kéreg nemcsak használja, hanem finom felbontásban irányítja is a saját hangolását. Ennek a huroknak a ciklusai felelnek meg a GNW egyes állapotainak és a hurok működése a gyorsan váltakozó tudatállapotoknak. Egy reaktív, inger vezérelt egyszerű agyból egy proaktív, motivációk és tervek által vezérelt agy lett. Úgy érzem az agykutatásban ezen a területen még sok izgalmas kérdés van, és az elkövetkező években itt várható számos nagy kátyú betömése.



A homloklebeny bemenetei (fent) és kimenetei (lent) az MK-k felől/felé. Rövidítések: mPFC: mediális prefrontalcortex (homloklebeny, tervezés), NAc: nucleus accumbens (tanulás, megerősítés), Th: talamusz (információ átkapcsolás), AMY: amigdala (érzelmek), LHb: laterális Habenula (jutalom értékelés), vHIPP: ventrális hippokampusz (memória), VTA: ventrális tegmentális terület (dopamin, tanulás), DRN: dorasal raphe mag (szerotonin), LC: locus coeruleus (noradrenalin, figyelem)

Ezzel végére is értünk az utolsó meredek kaptatónak mely a negyedik, az agyi meta-hálózatok dinamikájáról szóló részhez tartozott. Gratulálok mindenkinek, aki felkapaszkodott idáig. Viszont nem fejezzük még be az #agysétát, mert sok megbeszélni és finomítani valónk van. Mostantól kezdve kevesebb tény, több elmélkedés, azaz egy laposabb terep következik. Egy elméleti kitekintéssel folytatjuk, hamarosan.

Szerző: **Gulyás Attila**

Elméleti kitérő: a párhuzamos-soros probléma feloldása I.

Emlékszik még rá valaki? A második évadban, amikor a kishálózatok tulajdonságait tárgyaltuk, a konnekcionizmus és a PDP keretében, a soros és párhuzamos feldolgozás különbségeit és ellentmondásait is tárgyaltuk. Egy 3 évtizeden átnyúló fejtörésem az volt: Hogyan tud az alapjában párhuzamosan működő idegsejthálózatokból álló, és ezért példákból tanuló és általánosítani nem képes agy algoritmikusan, lépésről lépésre, sorosan, algoritmikusan gondolkodni?

Hiszen azt tanultuk, a PDP hálózatok nem tudnak tetszőleges mintázattal manipulációt végezni, csak azzal, amivel már találkoztak és megtanulták. Nem tudnak olyat, mint egy függvény, egy matematikai formula vagy egy számítógépes szubrutin, hogy tetszőleges

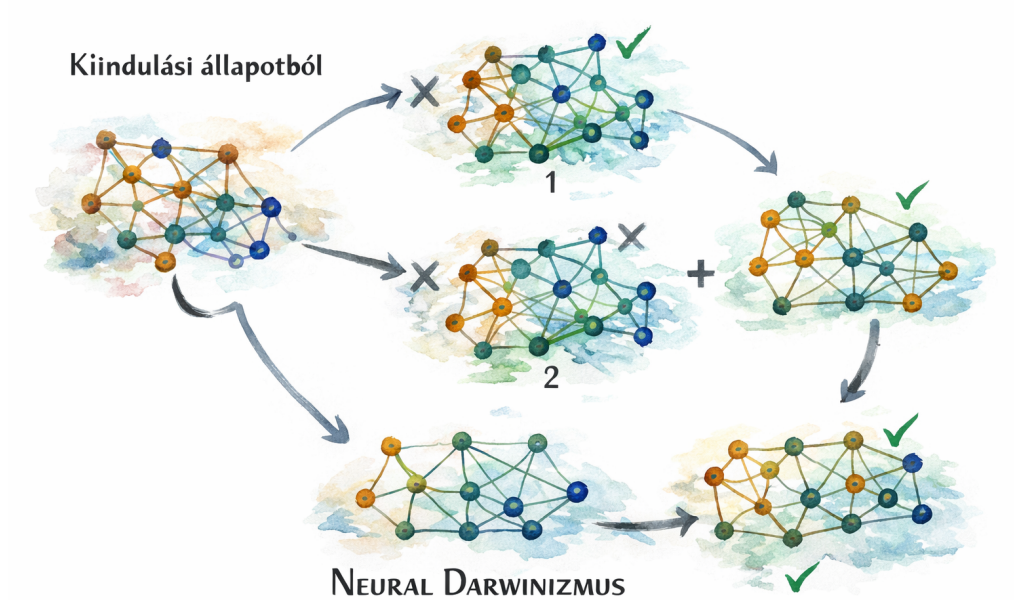
számokat, adatokat beletéve, műveleteket végezzenek ezekkel. Első osztályban mi is csak azt tanuljuk, hogy 1+1=1, 1+2=3, 2+2=4. Kérdezz meg egy elsőst mennyi 8+8, csak ha nagyon okos jön rá, hogy 16 (vagy leveszi a cipőjét is, hogy addig elszámoljon egyesével). Aztán később persze megtanuljuk az algoritmusokat és szabályokat.



Az 1+1 az 2, 2+1 az 3 rutinjára képesek a párhuzamos konnekcionista hálók, de ahhoz, hogy összetetten tudjunk gondolkodni az agy meta-hálózatainak meg kell tanulniuk algoritmikusan, lépésenként gondolkodni. Ellenkező esetben vehetjük le a cipőnket, hogy elszámoljunk 16-ig.

De hogyan alkalmazzuk ezeket?

Dehaene kísérlete és a GNW megoldást kínál erre a problémára. A homloklebeny a meta-hálózatokban rekurrenciát, több körös visszacsatolást használva, képes lépésenként gondolkodni, a párhuzamos architektúrájú kishálózatokat használva. Amikor adódik egy feladat, a PFC meghív számos agyterületet a GNW-be, és kiosztja a feladatokat, pontosabban a feladat megoldásának első lépéseit. Az agyterületek egyenként vagy együttműködve, gyorsan visszaadják az eredményt, amit a korábban tanultak rutinja kínál. Ezeket a PFC megint megvizsgálja és a következő lépésben kiküldi az eredményt további feldolgozásra, esetleg kicsit más agyterületeknek, hogy párhuzamosan és rutinból mondjanak rá valamit. Ahogy a GNW-be kerül egy részlépés, tudatunkba is bekerül egy újabb gondolkodási lépés. Gyakran egy megoldási ág sikertelen, ekkor visszalépünk, pontosabban a PFC lép vissza, és más irányban újrakezdi a gondolatláncot.



Gondolkodásunkban is működik a kiválasztódás. Egy gondolatcsíra fejlődik, változik, elhal és új formákban bukkan fel, míg eljutunk a megoldásig. Sőt még két sikertelen megoldás kombinálásából (1 és 2 az ábrán) születhet egy job megoldás, mely a gondolat további változataival ötvöződik.

Itt azért el van dugva egy kis Darwinizmus, természetes kiválasztódás (angolul neural Darwinism vagy mental evolution néven ismert a megközelítés). Ez a visszacsatolt, belső állapotokkal is rendelkező rendszer, a feladatok megoldására alkalmazza a replikáció-mutáció-szelekció mechanizmust. Elindul egy kiindulási állapotból, eljut valahova, ha nem jó, jön a szelekció, visszalép egy előző közelítésre és próbál egy másik „mutációt". Sőt, itt még akár rekombináció is lehet, két közepesen sikeres megoldás elemeiből jöhet egy sokkal jobb. Persze itt ugye nem párhuzamosan folyik az evolúció, mint mondjuk a természetben, hanem itt is egy serializálás, sorosítás történik. Nem egyszerre értékelődnek ki a megoldások, hanem egymás után. Pontosabban, mélyebbre, a meta-hálózatok alá nézve vegyes a dolog. A tervezés hurkai részben bemutattuk a kéreg-striátum-talamusz kört. Itt a kishálózatok szintjén a mintázatok között valószínűleg történik párhuzamos verseny és szelekció, de erre jön rá a meta-hálózatok magasabb ciklusának, homloklebeny-GNW soros megoldása.



A párhuzamosan működő kishálózatok meta-hálózatokba szerveződnek. Az ezen a magasabbrendű hálózaton kialakuló GNW-be a ciklikusan 'meghívott' kishálózatok beadják tudásukat. Ebből alakul ki a soros feldolgozás, a tudatosság élménye. A képet egy sokrétegű hálózat a ChatGPT készítette a párizsi Hölgy és az Egyszarvú reneszánsz stílusában.

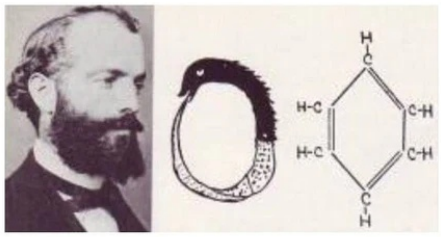
A GNW egyes területein lehetnek megoldási sémák, amik közül választ, vagy sémát vált, amikor egy irány sikertelennek bizonyult (ugye erre is kell és bizonyára van is memória, merre jártunk már, mi nem működött). Ráadásul a sémákat is tanulja, ha valami hatékony új sémára bukkan a megoldás során, akkor a striatális, nucleus accumbens körök segedelmével beemeli a repertoárba. Ez a többlépéses, visszacsatolt iteráció teheti képessé a párhuzamos architektúrájú agyat egyféle algoritmikus, soros gondolkodásra, sémák használatára és alakítja ki tudatunkban a soros, algoritmikus gondolkodás élményét és képességét.

Aki használja Nagy Nyelvi Modelleket (ChatGPT, DeppSeek) a mindennapokban és résen van láthatja, hogy ezekben a párhuzamos hálózatokban is megjelenik a lépésenkénti feladatmegoldás. Egy feladat elvégzésekor, ha megfelelően van beállítva

kiírja, hogy éppen milyen gondolkodási lépéseken megy keresztül, hol akad el, milyen más irányokat próbál.

- Kiinduló feltevés: X.
- Ezt ellenőrzöm: Y.
- Itt gond van: az adat inkább Z felé mutat.
- Emiatt visszalépek, és másik megközelítést választok.
- Új szempont: ...
- Következtetés: ...

Ugyan a visszacsatolás fontossága fejezetben azt írtam, hogy az LLM-ekben nincs visszacsatolás, annyit azért fejlődtek, hogy míg a sokszáz előrecsatolt rétegben nincs rekurzió, a feladat időleges megoldását egy következő ciklusban hozzácsapják a korábbi prompthoz és újra beadják a rendszernek. Így ezzel a részleges rekurzióval már képesek többlépcsős, iteratív gondolkodásra.



A tudománytörténet egyik híres esete, amikor a benzol (C6H6) szerkezetén töprengő Friedrich August Kekulé álmában a farkába harapó Ouroboros kígyót és egymás kezét fogó, körben táncoló majmokat látott. Ez vezette arra gondolatra, hogy a benzol egy gyűrű alakú molekula. Agya dolgozott a megoldáson, csak ennek lépései nem tudatosodtak.

Biztos mindenkinek volt már olyan élménye (és a tudománytörténet is beszámol számos ilyen esetről), hogy egy kérdésre, amin régóta rágódik, egyszercsak megálmodta a választ, vagy egyszer csak az felbukkant a „semmiből". Nyilván ilyenkor is sokat dolgoznak agyi rendszereink a problémán, csak ez a folyamat nem lép be teljes egészébe a GNW-be (mert akadnak égetőbb feladatok is), és ezért nem tudatosodik bennünk mi történik. Ilyenkor ugye nem is tudjuk hogyan jutottunk el a megoldáshoz, nem emlékszünk lépésire, hiszen nem a GNW-ben keletkeztek. Ezért a lépések nem verbalizálódtak (akár csak gondolati szinten) és nem kerültek a munka, majd a végleges memóriába.

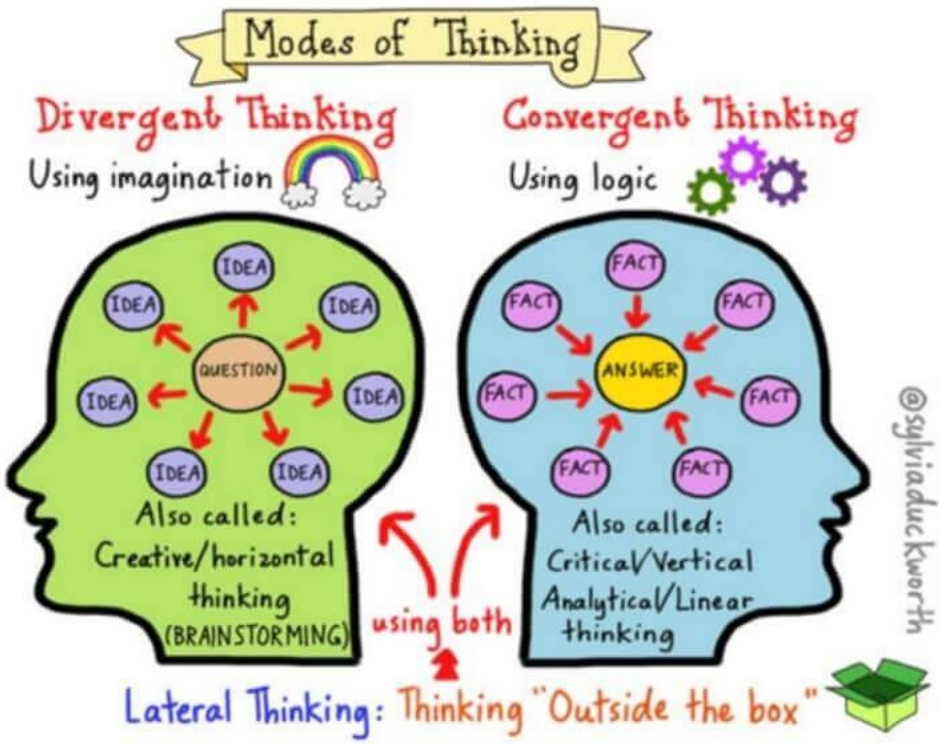
Meglátásunkat az intuitív gondolkodás csodájának tartjuk, pedig csak nem voltunk tudatában a lépéseknek, amiket agyunk rendszerei megtettek.
Egy meglehetősen személyes élményem szemléletesen mutatja be a tudatos és intuitív gondolkodás közötti keskeny határt.

Életem egy problémás szakaszában komoly álmatlanságban szenvedtem. A csúcsponton volt egy hónap, amikor gyakran napokig nem aludtam. Az alvás-ébrenlét hullámzó görbéje kisimult. Nappal pontosan annyira voltam éber, mint amikor este megpróbáltam aludni. Az extrém alvásmegvonás eredményeként tudatosságom teljesen megváltozott. Rövidtávú memóriám gyakorlatilag megszűnt. Egy tudományos cikk olvasásakor, mire a mondat végére értem, nem emlékeztem a mondat elejére, általában sokadik olvasásra feladtam és mentem tovább. Amikor egy kollegám egy problémát próbált velem megbeszélni, hallottam, hogy beszél, láttam, hogy mozog a szája, de semmit nem értettem abból, amit mondott. A szavakat kb. értettem, de a mondatokat és mondandója nagyléptékű tartalmát nem. Mindennek ellenére, a megrázó élményem az volt, hogy amikor kollegám befejezte mondandóját és kérdését, akkor én arra egy teljesen használható, kreatív választ adtam. Ezen persze én is igencsak meglepődtem. Válaszom tartalmával csak akkor szembesültem, amikor azt kimondtam. Az volt az élményem, hogy míg a logikus gondolkodásom gyakorlatilag eltűnt, az intuitív megerősödött. Egy másik példa ebből az időből. Nemigen szoktam rejtvényújságból rejtvényeket fejteni, mert bőven van másról gondolkodnom. De valahogy az asztalomra került egy rejtvényújság, amelyben volt egy szókirakós feladat. Egy verset beleírtak egy 9x9-es táblázatba, majd ezt felvágták 3x3-as darabokra és összekeverték. Normális esetben én ezt próbálkozással oldanám meg, logikusan,

lépésről-lépésre. Az akkori bamba-marha állapotomban kómásan néztem a darabokat 1-2 percig, majd próbálkozás nélkül, „intuitívan" ripsz-ropsz kiraktam elsőre a helyes megoldást.

Mit tanultam mindebből?

Ugye eltűnt a rövidtávú memóriám, és ezzel egyidőben nehezen tudatosodtak bennem dolgok, valamint még a logikus, lépésenkénti, érvelő gondolkodásom is eltűnt. Fel kell tételeznem (és persze az agykutatás eredményei is ezt mutatják), hogy a 3 dolog erősen összefügg. Az alvásmegvonás miatt nyilván teljesen felborultak a moduláló átvivőanyag rendszereim, melynek eredményeként agyam koordinációja lapátra került, nehezen aktiválódott a GNW. De két dolog figyelemre méltó volt. Egyrészt, hogy a rövidtávú, munkamemória milyen érzékeny egy ilyen állapotra, másrészt, hogy a nem tudatos feladatmegoldásom működött. Vélhetőleg azért, mert az egyedi agykéreg területek még a megtépázott kölcsönhatások ellenére is tették a dolgukat. Számomra az intuitív feladatmegoldás ezek alapján tehát azt jelenti, hogy az érvelési lépések lezajlanak, de mivel azok nem kerülnek be a GNW-be, a tudatosságba, ezért nem lépésenkénti, érvelő, logikus feladatmegoldásként, hanem kimondásukkor vagy végrehajtásukkor „Isteni szikraként" éljük meg azokat.



Többféle gondolkodási mód létezik agyunkban. Mint mindig, középen lehet az igazság. Ha váltogatunk a módok között messzebbre juthatunk. Bár azt hiszem az intuitív gondolkodást nem lehet erőltetni, inkább adottság, mint szerzett képesség.

Az intuitív versus logikus gondolkodás képességeit sokan körbejárták. Úgy tűnik annak is meg vannak az előnyei, amikor valami nem tudatosodik, nem algoritmikus. Lehetséges, az "out of the box" gondolkodáshoz pont arra van szükség, hogy a potenciális megoldások ne legyenek nagyon szigorúan körüljárva, legyenek benne őrültségek. De talán az igazság megint középen van a kettő vegyes használata az igazi. Ezt "lateral thinking"-nek, oldalirányú gondolkodásnak nevezik hívei.

Mellesleg megjegyzem, hogy egy később következő, operációs rendszerekről szóló bejegyzés még most kristályosodik az agyamban, vár az Isteni szikrára. Megírásához összeszedtem a gondolataimat, de azok egyenlőre, túl soknak bizonyultak, hogy

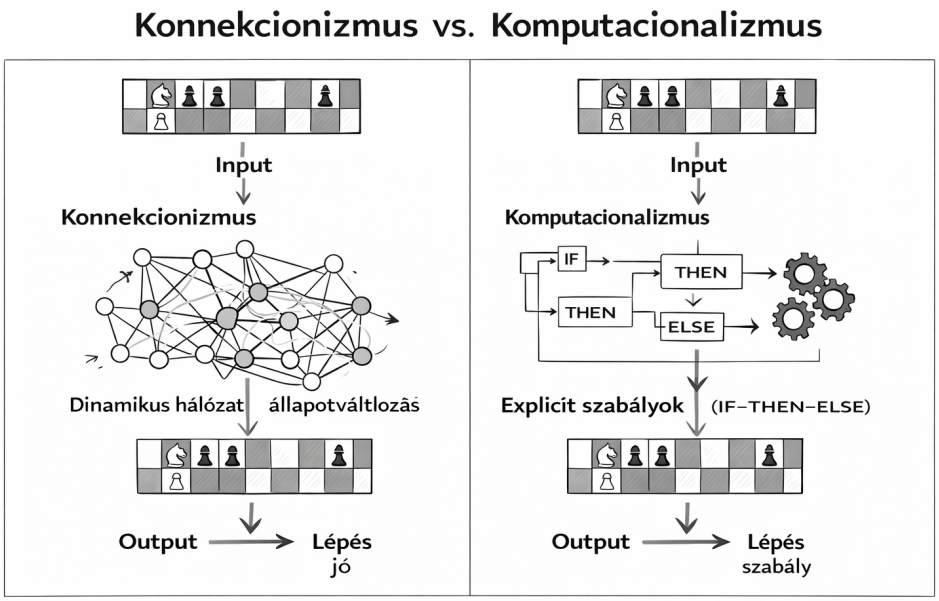
megfelelő sorrendbe tudjam kötni őket. Egy idő után otthagytam a feladatot és elkezdtem ezt a passzust írni, esélyt adva az ülepedésnek. Egy bonyolult gondolatmenetet nem feltétlenül egyenes időfonalban írja, aki írja. De mivel nem akartam Tarantino Ponyvaregénye módjára cikcakkban felfűzni a dolgokat, és így még tovább nehezíteni az Olvasóim dolgát, nem keletkezési időrendben, hanem egy gondolatmenetben közlöm őket. Én még nem tudom, de aki majd olvassa a fejezetet, majd tudja mire jutottam 😊.

Itt még nincs vége. További megemésztendő fogalompárok feldolgozásával folytatjuk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Elméleti kitérő: a párhuzamos-soros probléma feloldása II.

Ez előzően tárgyalt párhuzamos–soros működés mellett a konnekcionizmus körül két további „rejtett ellentétpár" is megjelenik. Ezek első ránézésre hasonlónak tűnnek, de valójában külön kérdésekre adnak eltérő válaszokat. Az egyik kérdés az: Hogy hogyan történik a számítás? A másik az: Hogyan van ábrázolva a tudás? Ez a kettő gyakran összekeveredik – innen a zavar.



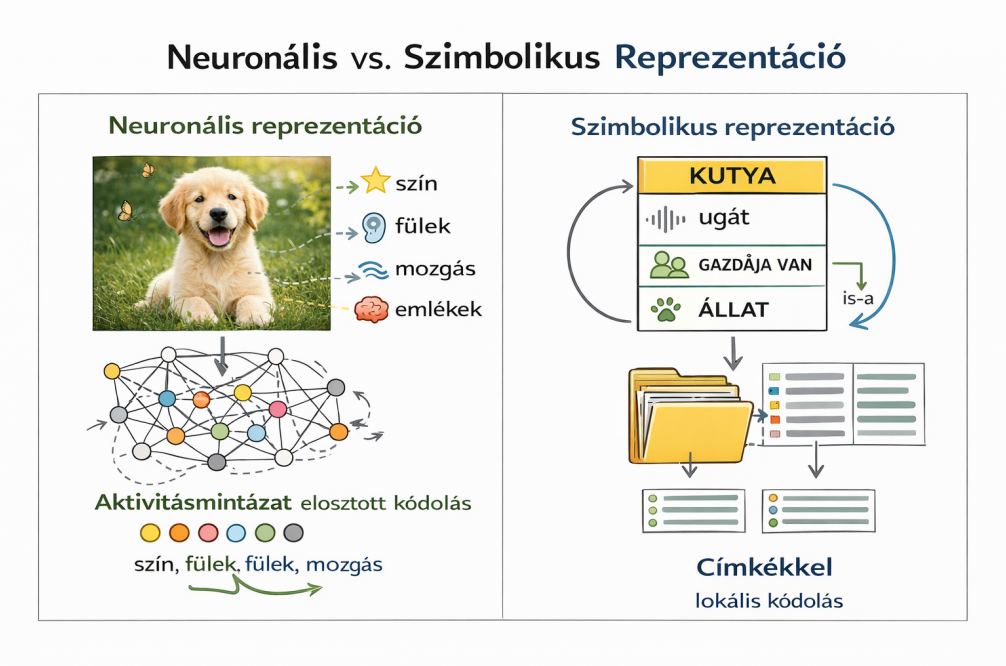
A két megközelítés a feldolgozás módjának különbségeit hangsúlyozza. A konnekcionalista elosztott, páruzamos, intuitív módon végzi a feladatot, nem látszanak a szabályok. A komputacionalista szabályokat alkalmaz és lépésenként működik. A szabályok a rendszer felépítésében vannak.

1. Konnekcionizmus vs. komputacionalizmus (K-K) – hogyan számol a rendszer?
A konnekcionista megközelítés szerint az agy nem szabályokat hajt végre, hanem egy hálózat állapota folyamatosan alakul. A „számítás" itt nem lépések sorozata, hanem egy dinamikus folyamat: az egységek egymásra hatnak, és végül kialakul egy stabil mintázat. A tanulás azt jelenti, hogy a kapcsolatok erőssége megváltozik. Ezzel szemben a klasszikus komputacionalista szemlélet úgy tekint a gondolkodásra, mint egy program futására: vannak jól elkülöníthető elemek (szimbólumok), és ezekre explicit szabályok vonatkoznak. Egy egyszerű példa:

- komputacionalista rendszer - mint az IBM által több mint egy évtizede fejlesztett DeepBlue sakkprogram, amely szabályok alapján lép („ha ez történik, akkor azt lépd").

- konnekcionista rendszer - mint egy neurális háló, amely rengeteg játszma után „ráérez” a jó lépésekre, anélkül hogy expliciten le tudná írni a szabályokat. A Go világbajnokot legyőző AlphaGo AI hálózat már így működik.

A feszültség itt az, hogy a hálózatok jól tanulnak és robusztusak, de nehéz bennük „megmutatni”, hogy pontosan milyen szabályt használnak, a szabályalapú rendszerek átláthatók, de nehéz őket tanulóvá és rugalmasan általánosítóvá tenni.



A két megközelítés máshogy kódolja, reprezentálj a z állapotot. A Neuronálisban elszórt csomópont mintázatok jelentenek valamit és a mintázatok közötti kapcsolatok a szabály. Nehéz kiolvasni mind a jelentést, mind a szabályt, viszont könnyen tanul. A Szimbolikus hálóban a jelentést egyedi pontok hordozzák és a kapcsolatok relációkat jelentenek. Értheő mi történik, de nehéz tanítani.

2. Neuronális vs. szimbolikus (N-SZ) – hogyan van kódolva a jelentés?

Ez a második különbség már nem a működésről szól, hanem arról, hogy hol van a jelentés. A neuronális (hálózati) nézet szerint egy fogalom nem egyetlen helyen van eltárolva. Például a „kutya” nem egy címke, hanem sok neuron aktivitásának mintázata: színek, formák, mozgás, emlékek együttese. A szimbolikus nézet ezzel szemben azt mondja: van egy jól azonosítható egység („kutya”), és ehhez relációk kapcsolódnak („ugat”, „állat”, „gazdája van”).

Egy hétköznapi analógia:

1. neuronális reprezentáció - mint egy fénykép, a jelentés a teljes kép mintázatában van.
2. szimbolikus reprezentáció - mint egy adatbázis, külön mezők és kapcsolatok írják le az objektumot.

A probléma itt az, hogy a hálózati rendszerek nehezen kezelnek pontos, szabályszerű szerkezeteket (pl. változókat: „X szereti Y-t”), a szimbolikus rendszerek viszont nehezen tanulnak zajos, hiányos adatokból.

A két dichotómia gyakran keveredik, mert a gyakorlatban gyakran együtt jelennek meg. A konnekcionista modellek többnyire neuronális (elosztott) reprezentációt használnak, a komputacionalista modellek többnyire szimbolikus reprezentációval dolgoznak. De ez nem szükségszerű. Elvileg lehetne neurális háló, amely szimbolikus struktúrákat tanul, vagy szabályalapú rendszer, amely elosztott reprezentációkat használ.

Ha gráfként képzeljük el a rendszereket, a különbség még kézzelfoghatóbb.
A konnekcionista / neuronális hálóban a csomópontok egyszerű egységek (mint neuronok),

az élek csak azt mondják meg, hogy egyik mennyire hat a másikra, a jelentés nem egy helyen van, hanem a teljes aktivitásmintázatban jelenik meg. Ez olyan, mint egy tömeg: az egyes emberek nem „jelentenek" semmit külön, de együtt kirajzolnak egy alakzatot. A szimbolikus / komputacionalista hálóban a csomópontok konkrét dolgokat jelentenek („kutya", „gazda"), az élek típusa is jelentést hordoz („tulajdonosa", „része", „oka"), a struktúra maga írja le a tudást. Ez inkább egy térképhez hasonlít, ahol minden pont és kapcsolat fel van címkézve.

A két világ közti legfontosabb eltérés így foglalható össze: a konnekcionista rendszerekben a jelentés a mintázatban van, a szimbolikus rendszerekben a jelentés a szerkezetben van. Ezért az első esetben a „mit jelent ez?" kérdésre csak a teljes rendszer állapotát nézve tudunk válaszolni, míg a másodikban elég „leolvasni" a struktúrát.

Mit igazít ezeken a dichotómiákon mindaz, amit megtudtunk a tudatosság dinamikájáról és kialakulásáról?

Azt gondolom, hogy az a megállapítás – miszerint az agyat meta-hálózatokba szerveződő kis-hálózatoknak tekinthetjük, melyek létrehozzák a GNW-t – bár nem törli el a K-K és N-SZ kettősségeket, de értelmezési keretet ad azoknak. Rámutat arra, hogy igazából nem ellentmondások, hanem rosszul feltett kérdések. A K-K eset a könnyebb. A modern kép azzal helyesbít, hogy nem VAGY a két értelmezés viszonya, hanem ÉS. A lokális modulok (kishálózatok) konnekcionistán működnek (elosztott reprezentációk, asszociatív tanulás, statisztikus általánosítás, nincsenek szabályok – példák vannak), míg a meta-hálózatokon realizálódó homloklebeny dinamika eredménye a komputacionalisa algoritmusok, lépések, rekurziók, állapotátmenetek képe. A N-SZ probléma lényege ugye, hogy a neuronális nézőpont szerint a reprezentáció elosztott, a feldolgozás „intuitív", a szimbólikus nézőpont szerint pedig a reprezentáció egyértelmű egységekben történik és a feldolgozás szabályvezérelt. A GNW nem állítja, hogy a szimbólumok valódi, lokális objektumok lennének az agyban (ennek kis-hálózataiban). Ehelyett: a „szimbólum" egy stabilizált, globálisan hozzáférhető neurális mintázat (a meta-hálózatokban), amely elég hosszú ideig fennmarad, elég sok modulhoz eljut, és egymás után rekurzívan újra beírható a workspace-be. A „szimbólum" tehát itt nem egy különálló, önmagában létező dolog az agyban, hanem egy átmenetileg stabil működési állapot, amely úgy viselkedik, mintha szimbólum lenne. Praktikusan pl. nincs „HA-AKKOR" idegsejt, hanem HA-AKKOR-szerű dinamikus állapot van. Ez nem megoldás az N-SZ vitára, hanem átkeretezi, feleslegessé teszi: **a szimbolikus viselkedés emergens tulajdonság, nem alapegység, a neuronális aktivitás feletti meta-mintázatok szintjén értelmezhető.**



Az agy kétszintű (kishálózatok / meta-hálózatok) felépítése orvosolja a kettősségek feszültségét. Az agyterületek konnekcionista-neuronális, a tudatosság, a GNWbe meghívott meta-hálózat, pedig szimbolikus-komputacionalista feldolgozást valósítanak meg. Egymás mellett (felett).

Ezzel néhány probléma kipipálva. Mindjárt megemésztünk egy következőt: a nyelv és a tudat viszonyát.

Szerző: **Gulyás Attila**

A beszéd és a tudatosság kapcsolata

És ha már soros-párhuzamos, intuitív-logikus, neuronális-szimbolikus, akkor pont ide illik, hogy a nyelv, a beszéd, a gondolkodás és a tudat kérdését is megforgassuk az elménkben.
Először is kezdjük azzal, hogy az emberi nyelv egy soros (serial) kommunikációs forma. Gyaníthatóan a hanghullámok, a hangképzés és a hallás fizikája miatt. Amit mondunk, azt csak időben egymás után rendezve tudjuk elmondani, és hogy bármit ily módon egyértelműen tudjunk rendezni, bonyolult szabályokra, szintaxisra van szükség. Nehéz párhuzamos dolgokat (érzelmek, érzések, absztrakt struktúrák) sorosan elmesélni.

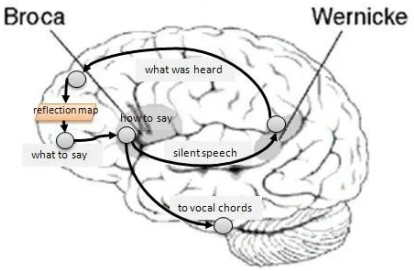


Együtt vadászó tintahalak a testükön végigszaladó színes hullámokkal kommunikálnak.

Bezzeg a tintahalak. Egyszer hosszasan figyeltem a tengerben egy szépia (tintahal) párt. A jó másfél araszos lábasfejűek egymástól jó néhány méterre tökéletes szinkronban úszva vadásztak, miközben testükön folyamatosan színes hullámok, minták futottak. Egyértelmű volt, hogy a fejlett látású állatok testüket képernyőként használva jeleztek egymásnak. Egy ilyen „beszéd", lehet, hogy sokkal párhuzamosabb, intuitívabb, mint a mi soros beszédünk, hiszen 3D mintázatokban (2D a testfelszínen + 1D az időben) zajlik. Az emberi kultúrák között is van hasonló különbség. Egy európai gyerek 1 év alatt megtanulja azt a 20-30 betűt, amit nyelve használ, és máris tud írni, olvasni. Egy kínai vagy egy japán iskolásnak 6-8 év kell ahhoz, hogy megtanulja a (kép)írásuk alapjaként szolgáló 1500-2000 karaktert (kanjit), és olvasni tudjon valamennyire. 12-14 év kell ahhoz, hogy a 4-6000 karaktert használó szakszövegeket is tudja olvasni, de akkor is csak a saját területén. Egy új kifejezés karakterét meg kell keresnie a szakszótárban. Viszont! Ha egy japán vagy kínai ember elé odatesznek egy írott lapot, akkor azonnal látja, hogy nagyjából miről szól. Ugyanis egy képet lát, mint Cipher a Mátrixban, aki látta mi történik a lehulló zöld karaktereket nézegetve. Persze a részletes olvasáshoz végig kell majd sorosan olvasnia és lépésenként értelmeznie a szöveget. Mindenesetre a képírás bár babrás, jelentősen párhuzamosabb és ezért gyorsabb kommunikációs forma, mint a betűírás.

Magától adódó kérdés, hogy a nyelv és a tudat miképpen határozza meg egymást? Bizonyára mindenkinek élménye a fejében zümmögő narratíva, amikor gondolkodik (bár ugye vannak a tudat alól is felbukkanó, látszólag hirtelen szikrák is). Ez utalhat arra, hogy gondolkodásunk alapjában nyelvi és nyelvünk határozza meg a tudatunkat. De mi van azzal, aki nem tud beszélni? Kérdezzünk még egyet. Hogyan és miért nem tud beszélni? Mert süket, vagy nem tud hangokat képezni? Ettől még sokan megtanulják a jelnyelveket, amiknek ugyanolyan bonyolult nyelvi szabályai (jelentés, struktúra stb.) vannak mit egy beszélt nyelvnek. Szóval még az is lehet a tudat határozza meg a nyelvet.
Ennek megfelelően a tudat-filozófusok között akad, aki az egyik vagy a másik megoldást támogatja. De, ahogy a Buddhizmus is mondja, a középút a legjobb. A modern kutatások is inkább egy mérsékeltebb álláspontot támogatnak: a nyelv valóban hatással van bizonyos kognitív folyamatokra, például a kategorizációra vagy az emlékezeti stratégiákra, de a gondolkodás alapvető mechanizmusai nem kizárólag nyelvi természetűek. Azaz, a nyelv és

a tudat egymás mellett létezik, de szorosan összefonódnak és befolyásolják egymást. Számomra is ez a legemészthetőbb, ami nem meglepő, hiszen annyit beszéltünk már a visszacsatolásokról.

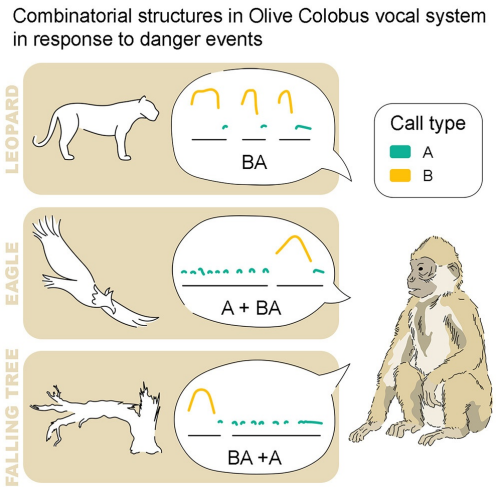


A beszédképzésben fontos Broca területet és a beszédértsben fontos Wernicke területet egy erős pályaredszer köti össze, így verbalizlt gondolatinkat kimondás nélkül is 'halljuk'.'



Gondolatink belső monológként is megjelennek tudatunkban. Ha csak ezt nézzük, azt gondolhatjuk a nyelv az elsődleges és ez határozza meg a tudatunkat. Összevetve a tudat és a nyelv jelenlétét az állatvilág többi tagjával, úgy tűnik az emberi nyelv csak egy újabb visszacsatolás, melytől önreflektív tudatunk összetettebbé válik.

Mint fentebb spekuláltunk, egy gondolatfolyam, egy tudatfolyam, a homloklebeny által összerendezett agykérgi funkcionális részhálók egymást követő kapcsolódása. Beszédképző rendszerünk (Broca terület, premotor kéreg stb.) szerepe, hogy belső gondolatainkat közlésre alkalmas formába alakítsa. Vélhetőleg, mint az újságírók egy sajtótájékoztatón, minden infót megkapnak és közzé is teszik. Hozzászoktak, hogy bármi történik, arról egy monológot készítenek. Ha ez a kapcsolat kétirányú, akkor nehéz kibogozni mi az elsődleges, mi minek az oka. Nézhetjük úgy is, a verbalitás határozza meg a gondolkodást, vagy fordítva, hogy a gondolkodásról számol be a verbalitás. Mint biológus, a gondolkodás és a tudat elsődlegessége mellett érvelek. Megint evolúciós alapokon. Elsősorban azzal, hogy az állati egyszerű és az összetett emberi tudat között nincs éles határ, számos tudatverzió létezik. Ettől független az ember fejlett nyelvi képessége. A nyelvhasználat rudimentális szintjeit különböző közösségekben élő állatoknál kimutatták . De még a csimpánzok, cetek és papagájok sem igazán képesek arra, amire az ember, hogy gyakorlatilag bármit elmondjanak (pedig meglehetősen sokat próbálkoztak ezzel a kutatók).



Fontos hangsúlyozni, hogy azt nem tekintjük nyelvnek amikor egy állat pl. vészjelzéssel figyelmezteti társait. Ez mindössze kommunikáció. A sokat emlegetett példa, hogy valamelyik majomfaj 3 különböző hangot ad a levegőből, a földről érkező ragadozó, valamint a kígyó jelzésére, nem nyelvet mutat be. A nyelv attól nyelv, hogy elemeinek szabad kombinálásával rugalmasan lehet, gyakorlatilag bármit kifejezni. A hangjelzések és az azokra adott válasz egyszerű asszociációval kialakulhat. Praktikusan a pavlovi második jelzőrendszer, amikor egy

A Colobus majmok 3 különféle vészjelzést adnak, attól függően hogy földi, légi ragadozót látnak vagy valamilyen egyéb veszélyt észlelnek. Ez még nem beszéd, csak jelzés. Nem képesek tetszőleges infomráció közlésére.

dolgot egy másik reprezentál. Ennek megértéséhez nem kell fejlett tudat és mondatszerkezeti elemzés.

Egy csimpánz tudatossága sok mindenben marad el az emberétől, de tagadhatatlan, hogy tudatos. Azaz nem marad más, mint a tudat elsődlegessége. Erre számos empirikus példa is utal. A csecsemők jóval azelőtt képesek komplex problémamegoldásra és világmodellek kialakítására, hogy megtanulnának beszélni. Az állatok szintén képesek tervezésre, eszközhasználatra és tanulásra, miközben nyelvi képességeik erősen korlátozottak. Mindez arra utal, hogy a gondolkodás alapvető formái nem a nyelvből származnak, hanem attól független idegrendszeri folyamatokból. Az idegtudományi vizsgálatok is hasonló következtetésre jutnak. A nyelvfeldolgozás kulcsfontosságú területei — például a bal oldali frontális lebenyben található Broca-terület és a temporális kéreg egyes részei — elsősorban a beszédprodukció és a nyelvtani szerkezetek feldolgozásában játszanak szerepet. Ugyanakkor számos afáziás beteg, aki súlyos nyelvi zavarokkal küzd, továbbra is képes összetett problémák megoldására, célirányos cselekvésre és a környezet értelmezésére. Ez arra utal, hogy a tudatos gondolkodás és a nyelv idegrendszeri alapjai csak részben fedik egymást.
Ez persze nem jelenti azt, hogy az emberi tudatban nem meghatározó a nyelv. A nyelv, a belső monológ kialakulása egy újabb nagyon hasznos visszacsatolást jelent agyunk számára. Lásd az intuitív-tudatos gondolkodás tárgyalásánál említett személyes élményemet: akkor szembesültem tudatosan először saját döntésem eredményével, amikor azt először kimondtam. A nyelv által képesek vagyunk elvontabb verbális gondolatmenetekre, GNW-nk még hatékonyabban foglal magában dolgokat, tudatosságunk kap egy nagy segítséget (még egy globális visszacsatolás). Az orosz pszichológus Lev Vygotsky klasszikus elmélete szerint a belső beszéd valójában a társas kommunikáció internalizált formája: az a mechanizmus, amely eredetileg másokkal való kommunikációra szolgált, később saját gondolataink szervezésének eszközévé válik.

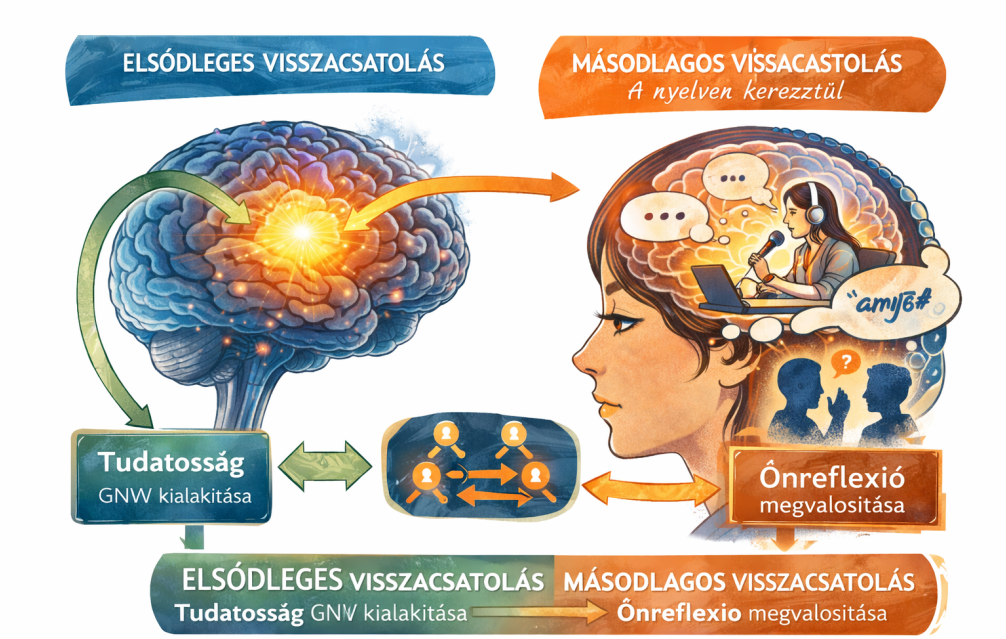


Vygotsky szerint a nyelv kialakulásakor az, elsősorban az emberősök közötti komunikációra szolgált. A kialakult nyelvértés és beszédközpontok közötti kapcsolat megerősödésével internalizálódhatott, elősegítve az önreflexív tudat kialakulását. Ez is egy elképzelés, akár így is lehetett.

Ebből a nézőpontból a nyelv és a tudat viszonya nem hierarchikus, hanem kölcsönös. A gondolkodás alapvető formái valószínűleg nyelv nélkül is léteznek, de a nyelv rendkívül hatékony eszközt ad az agynak arra, hogy saját mentális folyamatait strukturálja, stabilizálja és reflektálja. A belső beszéd így egyfajta globális visszacsatolási hurkot hoz létre az agyban: a gondolat nyelvi formát ölt, majd ez a nyelvi reprezentáció visszahat a gondolkodási folyamatokra.

Ebben az értelemben **a nyelv nem a tudat alapja, hanem annak egyik legerősebb erősítő mechanizmusa. Az emberi tudat különlegessége talán éppen abban rejlik, hogy az agy képes saját működéséről narratívát alkotni — és ez a narratíva a nyelv segítségével válik**

stabil, megosztható és reflektálható gondolatfolyammá.



Az agy számtalan visszacsatolása teszi lehetővé a tudatosság kialakulását a GNW-n. A beszéd megjelenésével, majd internalizációjával egy újabb visszacsatolás jelent meg, mely lehetővé teszi az önmagunkra reflektálást és ezzel egy összetettebb tudatállapot kialakulását teszi lehetővé. Elnézést kérek a ChatGPT nevében a helyesírási hibákért.

Összefoglalva:
1. A nyelv nem azonos a tudattal. Létezik nem-nyelvi tudatos tapasztalás: az észlelés, az érzelem, a szándék nem igényli a nyelvet. A nyelv inkább a reprezentáció és kommunikáció eszköze, mintsem maga a gondolkodás hordozója.
2. A nyelv kulcs az „önmagára irányuló tudathoz" — a meta-tudathoz, mely így nyelvi közvetítéshez kötött.

Tehát, a nyelv nem feltétele a tudatnak, de feltétele a nyelvileg szervezett, önreflexív tudatnak.

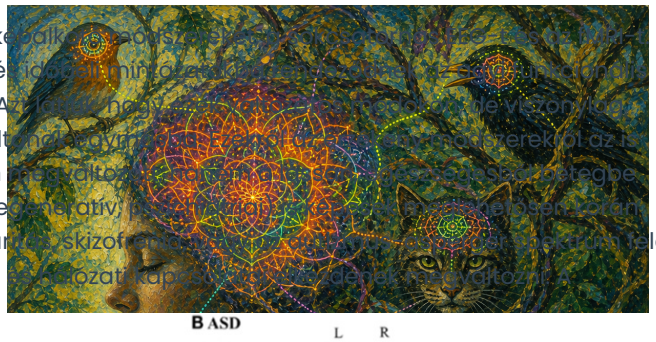
Szerző: **Gulyás Attila**

A tudatállapotok bozótósa

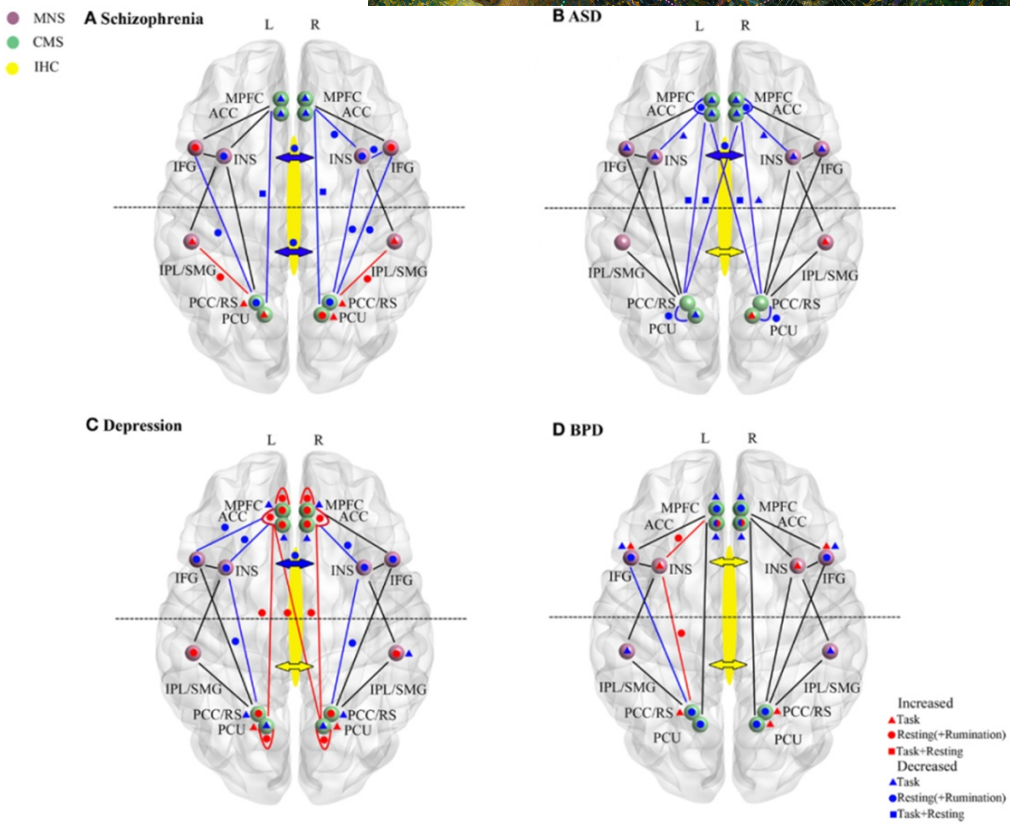
A nyelv és a tudat viszonyának tisztázása után egy minisorozatban azt beszéljük meg, hogy a tudat nem szilárd, hanem változékony, illékony. Először a „tudatállapotok szivárványa" címet akartam adni ennek minisorozatnak, de a szivárványban van egyfajta kéktől- vörösig egyirányú haladás.

Azonban a tudatállapotok sokfélék, elágaznak, összefonódhatnak, szóval amibe belemászunk az leginkább egy bozótosra hasonlít. Egy bozótosban pedig magunkon kívül lehet még madarakkal, csigákkal, pockokkal, gilisztákkal és ritkán vadmacskával vagy borzzal találkozni. Ezeknek a lényeknek bátran tulajdoníthatunk rájuk jellemző sajátos tudatot és tudatállapotokat. Régen túlléptünk azon az vallásos, imperialista, patriarchális nézeten, hogy tudata csak az embernek, a fehér embernek, azon belül is csak a férfiaknak van. Nem sorolnám az érveket mind, hiszen elég csak ránézni egy kutyára, egy madárra és látszik lakik bent valaki.

Messzelátó a bozótoshoz



Vegyük elő még egyszer az agyi ke
Ezekkel tárjuk ugye fel milyen tér é
hálózatok gondolkodásuk során. Az
szabályosan kapcsolódnak és vált
kiderült, hogy nemcsak az akutan
csúszó tudatállapotokat (neurode
kiszúrni. Egy Alzheimer-kór, bipolar
elmozduló agy működési ritmusa



Az egészséges agyra jellemző funkcionális hálózatszerkezetek és váltakozásuk mintázata megváltozik pszichiátriai zavarokban. Az ábra piros és kék jelekkel jelzi, hogy az egészségeshez képest hol nőtt és csökkent az aktivitás erőssége 4 zavar esetében. A körök a DMN aktivációja alatti, a háromszögek a feladathelyzetben, a négyzetek pedig a mindkét esetben megváltozó agyterület aktivációkat jelzik (nő vagy csökken a színek szerint). De ugye egy hálózatban nem csak a csomópontok, hanem az élek is változhatnak. A megváltozott kölcsönhatás erősségeket is a piros-kék vonalak jelzik. ASD: Asperger spektrum, BPD: bipoláris depresszió.

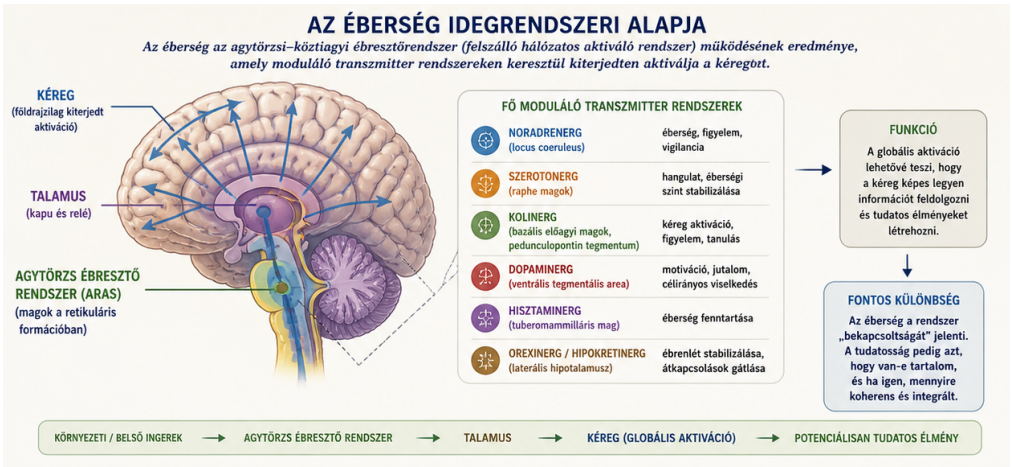
funkcionális hálózatok aktivációja a normálistól eltérő mintázatot követ. A tapasztalatok szerint már jóval a viselkedési tünetek előtt megindulnak ezek a mérhető változások. Így ezek a módszerek lehetővé teszik a fenti betegségek korai diagnosztizálását, és ezáltal reménytelibb kezelését. Nem kell megvárni míg egy agy elkezd sántítani, már a finom bicegést is észre lehet venni, és terápiát javasolni. Nézzük meg mit tudtunk meg ezekkel módszerekkel a különböző tudatállapotokról.
Először az egészséges, majd a megváltozott és kóros tudatállapotokat fogjuk boncolgatni. Ezeket követi majd az állati tudatszintek és tudatmódok méltányolása. A minisorozatot a gyermekből felnőtté váló kamasz agy metamorfózisának leírásával zárjuk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az emberi tudatállapotok I.

Azt már tisztáztuk, hogy a törzsfejlődés során a tudat nem „nulla vagy semmi". De most az is kiderül, még csak nem is egy egyenes mentén elhelyezhető jelenség. Nem egyetlen kapcsoló állása határozza meg, hanem egy többdimenziós állapottér, amelyben az agy különböző funkcionális rendszerei eltérő kölcsönható állapotokba rendeződnek.

A hétköznapi nyelv hajlamos a tudatot az éberséggel azonosítani, holott az idegtudomány szempontjából az éberség csak egy változó, a tudattartalom gazdagsága, az önélmény stabilitása, a kognitív kontroll és az időbeli integráció részben független változói mellett. Egy tudatállapot attól válik „egészségessé", „megváltozottá" vagy „patológiássá", hogy ezek a dimenziók mennyire összefüggő, alkalmazkodó módon működnek együtt.



Az éberség és a tudatosság nem azonos. Az egészséges tudatállapotokhoz megfelelő éberségre van szükség. Az éberséget a kéreg alatti felszálló aktiváló rendszerek hozzák létre.

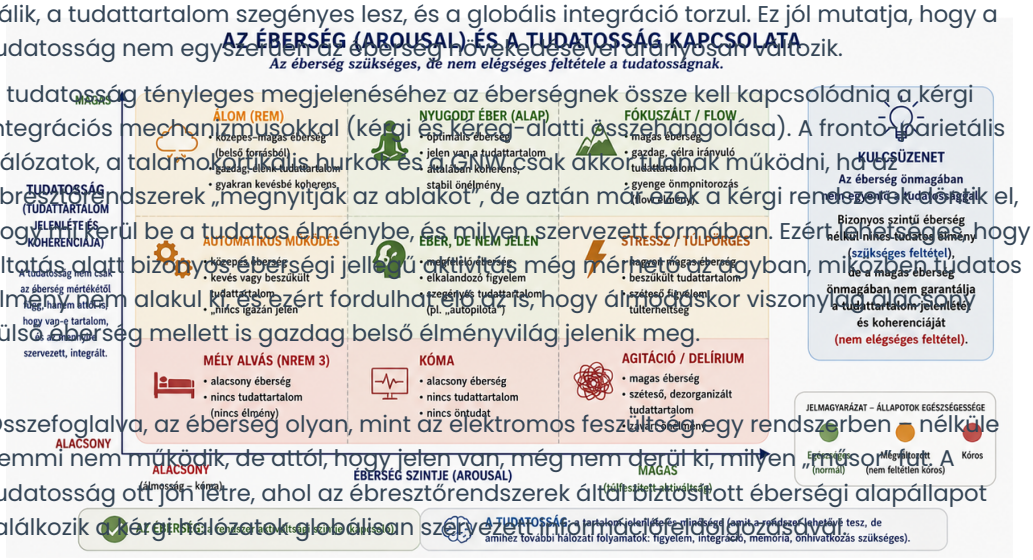
Mielőtt rátérnénk a tudatállapotokra, rágjuk meg egy kicsit az első dimenzió, az éberség szintje és a tudatosság közötti kapcsolatot. Röviden összefoglalva: az éberség szükséges, de nem elégséges feltétele a tudatosságnak. Bizonyos szintű éberség nélkül nincs tudatos élmény, de önmagában a magas éberség még nem garantálja sem a tudattartalom jelenlétét, sem annak koherenciáját. Ez a különbség kulcsfontosságú, mert segít megérteni, miért lehet valaki éber, mégis „nincs igazán jelen", és miért nem azonos a tudat a puszta aktiváltsággal. Az éberség szabályozásának idegrendszeri alapja az agytörzsi–köztiagyi ébresztőrendszer, amelyet klasszikusan „felszálló hálózatos aktiváló" rendszerként írtak le. Ennek magjai az agytörzsben helyezkednek el, és a már sokat emlegetett moduláló transzmitter rendszereken keresztül kiterjedten hatnak a kérgi hálózatokra. A noradrenerg locus coeruleus, a szerotonerg raphe-magvak, a kolinerg pedunculopontin és laterodorsalis tegmentalis magvak, valamint a dopaminerg és hisztaminerg rendszerek a külső és belső ingerek hatására együtt határozzák meg, hogy az agy milyen mértékben van „ébrenléti üzemmódban".

Ezek a rendszerek nem konkrét információt közvetítenek, hanem hangolják az idegrendszer működését: beállítják az ingerlékenységet, a jel–zaj viszonyt és a válaszkészséget. Ezen ébresztő rendszerek sérülése még ép agykéreg esetén is beszűkült, csökkent tudatállapothoz, kómához vezethet, hiszen hiányzik az aktiválás és az összerendezés.

Az éberség hatása a tudatosságra közvetett. Megfelelő éberségi szint mellett a kérgi hálózatok képesek gyorsan reagálni, tartós aktivitást fenntartani, és a távoli agyterületek közötti kommunikációt biztosítani. Túl alacsony éberség esetén –mint mély alvásban, kómában vagy erős nyugtatásban– ez a kommunikáció megszakad, és a tudattartalom eltűnik vagy töredezetté válik. Ugyanakkor túl magas éberség mellett, például extrém stresszben vagy pánikállapotban, a tudatosság szintén beszűkülhet: a figyelem merevvé

válik, a tudattartalom szegényes lesz, és a globális integráció torzul. Ez jól mutatja, hogy a tudatosság nem egyszerűen az éberség növekedésével arányosan változik.

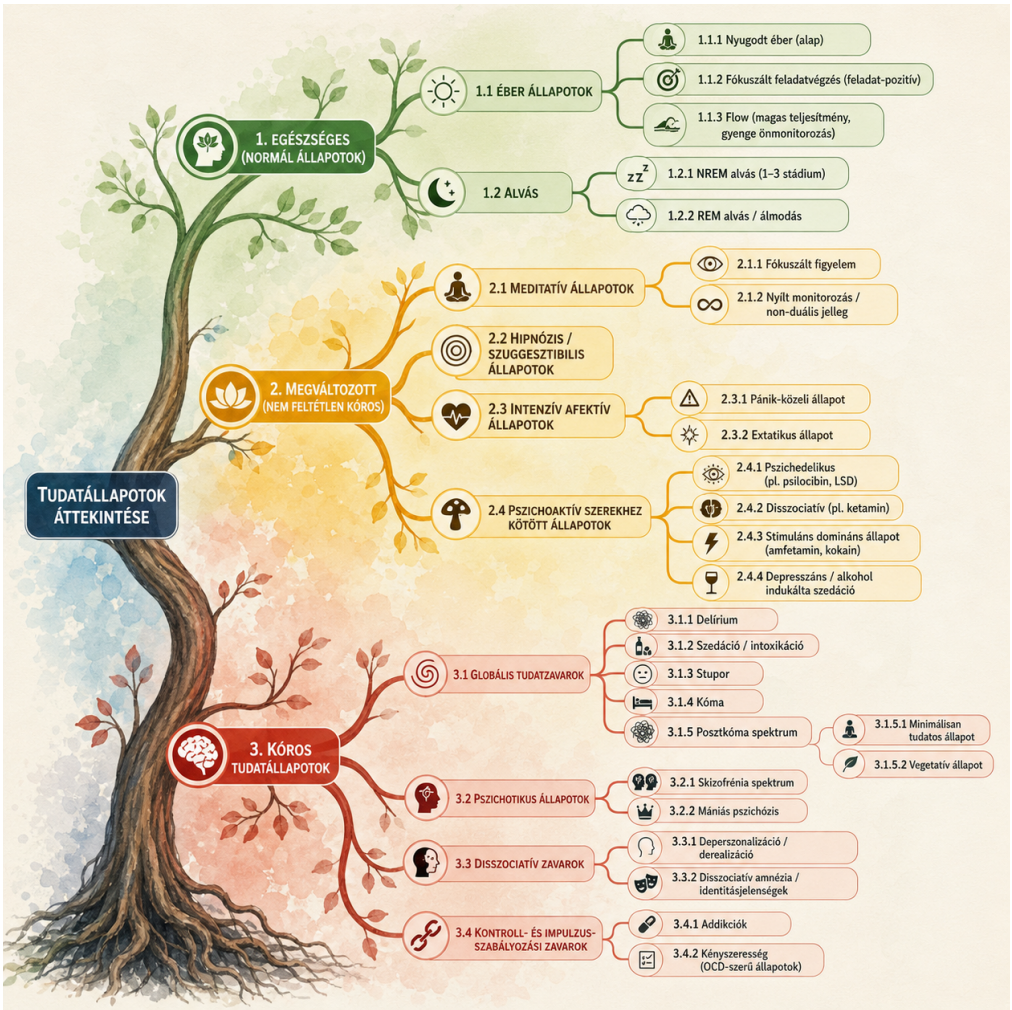
A tudatosság tényleges megjelenéséhez az éberségnek össze kell kapcsolódnia a kérgi integrációs mechanizmusokkal (kérgi és kéreg-alatti összehangolása). A fronto-parietális hálózatok, a talamokortikális hurkok és a claustrum csak akkor tudnak működni, ha az ébresztőrendszerek „megnyitják az ablakot", de aztán maguk a kérgi rendszerek döntik el, hogy mi kerül be a tudatos élménybe, és milyen szervezett formában. Ezért lehetséges, hogy altatás alatt bizonyos éberségi jellegű aktivitás még mérhető az agyban, miközben tudatos élmény nem alakul ki, és ezért fordulhat elő az is, hogy álmodáskor viszonylag alacsony külső éberség mellett is gazdag belső élményvilág jelenik meg.



Az éberséget biztosító kéreg alatti területek és a tudattartalmat biztosító agykéreg összjátékából alakulnak ki a különböző tudatállapotok.

Összefoglalva, az éberség olyan, mint az elektromos feszültség egy rendszerben – nélküle semmi nem működik, de attól, hogy jelen van, még nem derül ki, milyen „minőségű". A tudatosság ott jön létre, ahol az ébresztőrendszerek által biztosított éberségi alapállapot találkozik a kérgi hálózatok globálisan szervezett információfeldolgozásával.

És akkor most nézzünk egy gyors listát a tudatállapotokról:



Az emberitudatállapotok listája

Huhh. Jó sok volt. A részletezéssel folytatjuk.

Szerző: **Gulyás Attila**

Az emberi tudatállapotok II.

Az emberi tudatállapotok alaposabb kifejtésével folytatjuk az előző bejegyzést.

Az egészséges tudatállapot prototípusa a nyugodt éber állapot. Ilyenkor az agy éberségi szintje közepes, a külső és belső ingerek egyaránt hozzáférhetők, a figyelem rugalmasan vált a külvilág és a belső mentális tartalmak között (váltogatják egymást a funkcionális hálózatok). A GNW működőképes, de nem túlfeszített: a releváns információk hozzáférhetővé válnak, miközben a háttérben a DMN biztosítja az önélmény időbeli folytonosságát. Ebben az állapotban az Én stabil, a döntések összekapcsolódnak a korábbi tapasztalatokkal és jövőbeli célokkal, a tudatos élmény pedig összefüggő élményfolyamba rendeződik.

Ettől eltérő, de szintén egészséges konfiguráció a **fókuszált feladattudat**. Ilyenkor az éberség magasabb, a figyelem erősen beszűkül egy konkrét célra, és a fronto-parietális kontrollhálózat dominanciája elnyomja az önreferenciális gondolatokat. A tudattartalom szegényesebbnek tűnhet, mert kevés elem fér bele, de ezek nagy pontossággal és stabilitással vannak jelen. A DMN aktivitása csökken, az Én narratív jelenléte háttérbe szorul, miközben a viselkedés hatékony és célirányos marad. Ez jól mutatja, hogy a gazdag önreflexív tudat nem feltétele a hatékony cselekvésnek.



Tudatállapotunkat már testhelyzetünk elárulja, hiszen agyunk szabályozza testünk reakcióit is.

Kifáradáskor jelenik meg az álmos, **csökkent éberségű állapot**, amelyben a figyelem ingadozóvá válik, és a globális hozzáférés időszakosan megszakad. Ilyenkor a GNW működése labilis: rövid ideig még képes integrálni az információt, de egyre gyakoribbak a „kihagyások", a belső asszociációk és mikroalvás-szerű epizódok, miközben az önmonitorozás és a kognitív kontroll észrevétlenül gyengül. Ez az állapot különösen jól mutatja, hogy a tudatosság nem kapcsolóként, hanem dinamikus stabilitásként működik: az élmény még jelen van, de már nem megbízhatóan globális és nem tartósan hozzáférhető.

Az álmodás, különösen a **REM-alvás**, átmeneti helyet foglal el az éber és a megváltozott tudatállapotok között. A memóriák kialakulásánál volt arról szó milyen fontos szerepe van az alvásnak abban, hogy a középtávú memórianyomok összegyúródjanak és átkerüljenek a hosszútávú memóriába. Ennek folyományaként az agy éberségi szintje paradox módon

magas, miközben a szenzoros bemenet nagyrészt le van választva a külvilágról. A tudattartalom rendkívül gazdag és gyakran narratív, ugyanakkor az önkontroll és a realitásellenőrzés gyenge. Az Én illékony, töredezett vagy átalakuló, az idői és oksági viszonyok fellazulnak. Az álmodás világosan megmutatja, hogy a tudatos élmény nem egyszerűen az ébrenlét melléktermeke, hanem sajátos agyi konfigurációkban önállóan is megjelenhet.

A következő állapot a **nem-REM** alvás, ahol az éberség tovább csökken, a tudattartalom elszegényedik vagy szakaszosan megszűnik, és a globális integráció csak rövid, instabil epizódokban jelenik meg. Ennél mélyebb a nyugtatás és az altatás, ahol az éberségi rendszerek farmakológiailag gátoltak, a talamokortikális kommunikáció szétesik, és a tudattartalom rendszerint nem hozzáférhető. Ennek az állapotnak a részleteit hamarosan alaposabban tárgyaljuk.

A **megváltozott tudatállapotok** csoportjába olyan állapotok tartoznak, amelyek eltérnek a hétköznapi éber tudattól, de nem járnak szükségszerűen károsodással. A **meditatív állapotok** jó példái ennek. Ezekben az önmagunkról gondolkodás gyakran csökken, az Én elhalványul, miközben a testi észlelés, az aktuális jelenlét és a szenzoros élmények felerősödnek. Az időélmény megváltozik, a gondolatok kevésbé ragadnak magukkal. Itt nem a tudat „lecsökkenéséről” van szó, hanem arról, hogy más szervezőelv kerül előtérbe: kevesebb narratíva, több közvetlen tapasztalat.

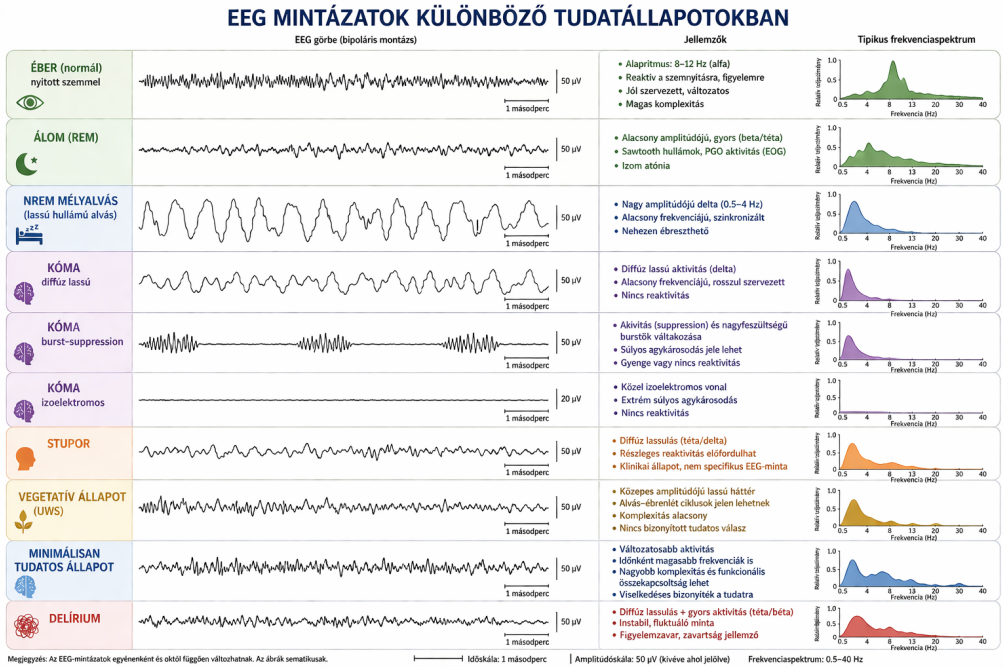
Hasonlóan nem patológiás, de eltérő konfiguráció a **flow állapot**. Ebben az esetben az éberség és a teljesítmény magas, a cselekvés finoman hangolt, miközben az önmonitorozás és az expliciten megélt Én hasonlóan háttérbe húzódik. A tudatos élmény minimális narrációval jár, mégis erős kontroll és hatékonyság jellemzi a viselkedést. Ez különösen fontos ellenpéldája annak a nézetnek, hogy a tudatos reflektáltság szükséges lenne a bonyolult cselekvésekhez.



Megváltozott tudatállapotok

A **pszichedelikus tudatállapotok** radikálisabban térnek el a megszokott konfigurációktól. Ilyenkor a DMN integritása gyakran megbomlik, a globális szervezőelv fellazul, miközben a tudattartalom rendkívül gazdaggá, asszociatívvá és sokszor kaotikussá válik. Az Én határai elmosódhatnak, az idő- és testélmény átalakul. Ezek az állapotok nem egyszerűen „intenzívebb” tudatot jelentenek, hanem olyan konfigurációkat, amelyekben az agy elveszíti

azt a képességét, hogy megbízhatóan előre jelezze, mi mi után következik. Emiatt a kontroll gyengül, miközben az élmények felerősödnek és nehezebben rendeződnek egységes képpé.



Az egyes tudatállapotokra jellegzetes EEG mintázatok jellemzőek. De ha igazán a dolgok mélyére akarunk ásni a sokcsatornás módszerek (sokcsatornás EEG, fMRI) pontosabb képet adnak, mert azoknál az összefüggések mintázata is felderíthető.

A patológiás tudatállapotokat nem az teszi problémássá, hogy szokatlan élményekkel járnak, hanem az, hogy a viselkedés és a döntések elveszítik kapcsolatukat a valós helyzettel és a saját célokkal. Az első lépcső a **minimálisan tudatos állapot**, amelyben az éberség részleges és időszakosan felismerhető, célirányos reakciók utalnak maradék tudattartalomra, de az integráció bizonytalan. A **stupor** olyan tudatállapot, amelyben az éberség súlyosan lecsökkent, és az egyén csak erős, általában fájdalmas ingerekre ad rövid, nem célirányos válaszokat. Külső megfigyelő számára a beteg „szinte elérhetetlennek” tűnik: nem kezdeményez mozgást, nem követ utasításokat, és spontán viselkedése alig van. Ami megkülönbözteti a mélyebb állapotoktól (például kómától), az az, hogy **reaktivitás még fennáll**, de ez fragmentált és nem integrált. **Akut tudatzavar**, nagyon alacsony éberség, csak erős ingerekre (fájdalom) adott rövid, nem célirányos reakciók jellemzik. Nincs megbízható jel a tudattartalomról. Jellemzően átmeneti, gyakran metabolikus vagy toxikus okú. Ettől elkülönül a **vegetatív állapot** (újabban: „unresponsive wakefulness syndrome”, válaszképtelen éber szindróma), ahol az alvás–ébrenlét ciklusok visszatérnek, az éberség fiziológiai jelei jelen vannak, de megbízható tudattartalomra utaló viselkedés nincs. A skála legalján a **kóma** helyezkedik el, ahol sem éberség, sem tudattartalom nem mutatható ki, és az agytörzsi–kérgi integráció súlyosan sérült. Itt valóban csökkent vagy hiányzó tudatról beszélhetünk.

Más betegségeknél a tudattartalom nem eltűnik, hanem rosszul szerveződik. **Disszociatív állapotok**ban az élmények jelen vannak, de az Én integritása sérül: a testhatárok, az identitás vagy az időbeli folytonosság megbomlik. **Pszichotikus állapotokban** – különösen skizofréniában – a tudattartalom gyakran rendkívül gazdag, de hibásan csatolódik az ingerekhez: belső gondolatok külső eseményként jelennek meg, a valóságmodell és az önmodell szétcsúszik. Itt nem a tudat hiányzik, hanem az a szervező mechanizmus, amely a tapasztalatot a világ és az Én koherens keretébe illesztené.

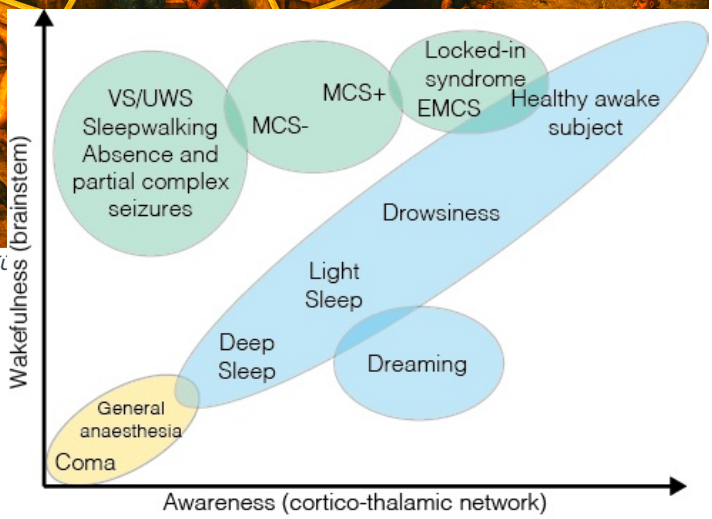
A **függőségek** sajátos helyet foglalnak el ebben a térben. Ugyan az érintett személy gyakran

tisztában van saját állapotával és következményeivel, a tudatos élmény jelen van, de mégsem képes a viselkedést hosszú távú céljaihoz igazítani. Itt a döntési tér beszűkül, a hajlam kóros szokásokra, és a tudatos felismerés önmagában nem elegendő a kontroll helyreállításához. Szándékunk nem az, hogy a tudatos élmény és az önszabályozás közötti fogalmakat az **OCD (kényszer-obszesszív zavar)** vagy az addikcióhoz hasonlóan jó példájaként írjuk le, hogy a tudatos felismerés és a viselkedés feletti kontroll élesen szétválhat. Az érintett személy tipikusan tisztában van azzal, hogy kényszergondolatai túlzóak vagy irracionálisak, és kényszercselekvései nem értelmesek, mégsem képes azokat tartósan gátolni. A tudattartalom tehát jelen van, de a döntési tér beszűkült. Az OCD így nem a tudat hiányáról szól, hanem arról, hogy az egyén nem az, amit tudja, amit tesz, hanem az, amit tudja, hogy ne tegyen, még akkor is, ha világosan érti annak értelmetlenségét.



Fülöp Lajos: A kísértés világa

Összességében a tudatállapotok nem egyetlen skálán rendezhetők el, ébrenlét és eszméletlen végpontok között. Sokkal inkább egy többdimenziós tér különböző pontjai, ahol az éberség, a tudattartalom gazdagsága, az önhivatkozás és az irányítás eltérő kombinációkban jelenik meg. A megváltozott állapotok nem szükségszerűen kórosak. A patológia nem a tudat hiányát, hanem a szervezőelvek összeomlását jelenti. Ez a szemlélet lehetővé teszi, hogy a tudatot ne morális vagy misztikus kategóriaként, hanem dinamikus idegrendszeri konfigurációk eredményeként értsük meg.



A tudatállapotokat nem lehet egyetlen sorba rendezni. Az ábra 2D-ben (éberség, tudatosság) mutatja az egyes előforduló tudatállapotokat, hiszen azok több tengely mentén helyezhetők el. Igazából még magasabb dimenzióban lenne helyes ábrázolni azokat. Erre a következő ábrán kísérletet is tesz a ChatGPT. Sokat fejlődött, de még azért hibádzik.

Záráskénti vegyük még elő azt a kérdést, hogy: miért nem emlékszünk az álmainkra? Biztos sokan ébrednek úgy reggel, hogy még motoszkál fejükben egy álom maradéka. Sokan ilyenkor megpróbálják egy kis utó-bóbiskolással átmenteni az álmot, de ez nagyon ritkán sikerül (legjobb ilyenkor gyorsan leírni és rendesen felébredve már be lehet emelni a memóriába). Bár velem előfordult néhányszor olyan, hogy egy délutáni szunyókálásnál előjött egy korábbi álmom (vagy legalábbis azt hittem).

Nos, a helyzet az, hogy az alvást és az ezzel járó álmodást, az evolúció többek között arra fejlesztette, hogy agyunk középtávú memóriájában összeálljanak és visszajátszódjanak a nap során raktározott fontos emléknyomok, majd átkerüljenek a hosszútávú memóriába. Az alvás tudatállapotában a visszajátszódó elemek újra aktiválódása létrehoz tudat szerű elemeket, álmokat, de a rendszer nem olyan állapotban van, hogy a történtekre emlékezzen. Itt pont a középtávú memóriából kell írni a hosszútávúba, nem pedig a tudatból a középtávúba. Ez kb. olyan lenne mintha egy film lejátszása közben az éppen történő eseményeket a film helyére vennénk fel. Érdekes káosz alakulna ki.

Szerző: **Gulyás Attila**

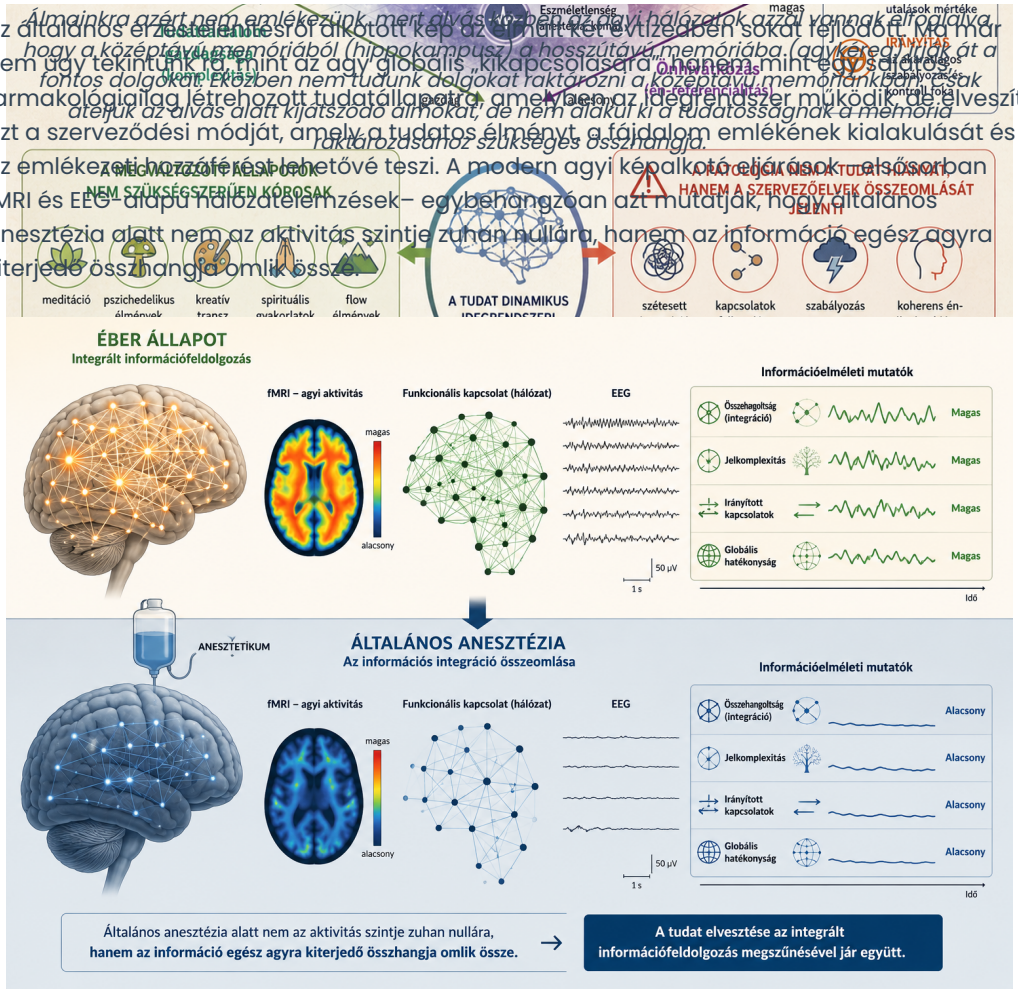
Nem alszik, nem éber, mi az? Egy speciális agyi állapot: az altatás



A magyar műtéti altatás szó angol megfelelője a „general anaesthesia" (GA), általános érzéstelenítésnek lehet fordítani. Pontosabb, mint a félrevezető magyar elnevezés. Ugyanis, GA-ban az agy működése egyáltalán nem hasonlít a természetesen alvó agy működésére. Más EEG mintázatokat mutat, és ami fontos, ebből az agyat külső erős ingerek (fájdalom) sem tudják felébreszteni. Sokáig senkinek lövése sem volt arról, mi is történik GA alatt. Hogy mi altató, mi méreg és mi fájdalomcsillapító, meglehetősen kiszámíthatatlan.

Altatáskor pengeélen kell táncolni, az agy működését csillapítani kell, de megállítani nem.

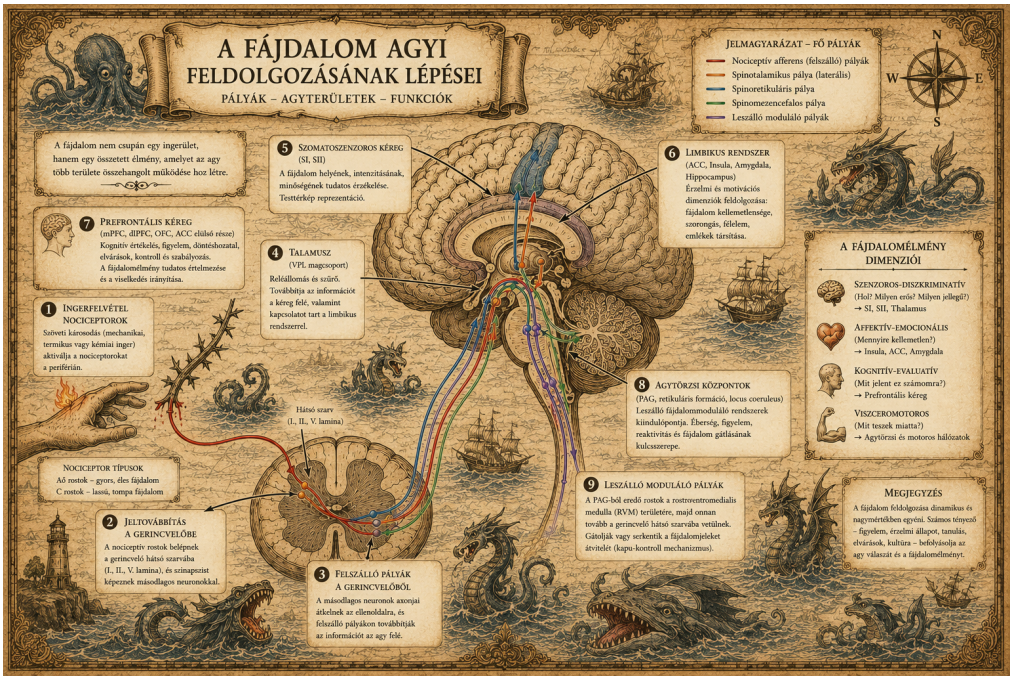
Az általános érzéstelenítésről alkotott kép az elmúlt kétévtizedben sokat fejlődött. Ma már nem úgy tekintünk rá, mint az agy globális „kikapcsolására", hanem mint egy sajátos farmakológiailag létrehozott tudatállapotra, amely az idegrendszer működik, de elveszíti azt a szerveződési módját, amely a tudatos élményt, a fájdalom emlékének kialakulását és az emlékezeti hozzáférést lehetővé teszi. A modern agyi képalkotó eljárások, elsősorban fMRI és EEG-alapú hálózatelemzések– egybehangzóan azt mutatják, hogy általános anesztézia alatt nem az aktivitás szintje zuhan nullára, hanem az információ egész agyra kiterjedő összhangja omlik össze.



AZ altatás alatt az agy működik, de nincs benne megfelel összhang ahhoz, hogy a fájdalom minősége és emléke kialakuljon.

Információelméleti mutatók, például az összehangoltság, a jelkomplexitás vagy az irányított kapcsolatok mértéke, altatás alatt drámaian csökkennek, ami jól illeszkedik ahhoz a képhez, hogy a tudat elvesztése az integrált információfeldolgozás megszűnésével jár együtt.
De mik az elemei annak, hogy bár az agy feldolgozza egy bizonyos szintig a fájdalomingert, az nem válik tudatos élménnyé, és semmilyen formában nem hagy hátra emlékezeti nyomot. Az általános anesztézia alatti mérések következetesen azt mutatják, hogy a fájdalom idegrendszeri feldolgozása és a fájdalom szubjektív megélése, illetve emlékezete szétválasztható folyamatok. Az a paradoxon, hogy viszonylag magas szintű kérgi aktivitás

mérhető, miközben sem élmény, sem emlék nem marad, csak akkor tűnik ellentmondásnak, ha a fájdalmat egységes jelenségnek tekintjük. A nocicepció perifériás és gerincvelői szintjein nincsen olyan értelemben vett „emlékezet", amely epizodikus vagy affektív nyomokat hordozna. Ugyan a fájdalomérzékelő idegek képesek érzékenyítődni, vagyis a későbbi ingerekre fokozott válasszal reagálni, de ez nem emlék, hanem fiziológiai állapotváltozás. A fájdalom megélése és emlékezete kizárólag központi idegrendszeri jelenség és több feltétel együttes teljesüléséhez kötött.



A fájdalom feldolgozásának és érzékelésének lépései. Ez egy hosszú, számtalan szinten zajló folyamat. A fájdalom hasznos, arra figyelmeztet, hogy óvjuk a fájó területet és ne kerüljünk megint ilyen helyzetbe.

Ahhoz, hogy egy fájdalomingert később fel tudjunk idézni, az ingernek az egész agyra kiterjedő integrált tudattartalommá kell válnia, érzelmi töltést (amigdala) kell kapnia, és be kell kapcsolódnia a hippokampusz-függő emlékezeti konszolidációba. Az általános anesztézia éppen ezeket a lépéseket választja szét.
Altatás alatt a fájdalominformációk egy része valóban eljut a kéregbe. A spinotalamikus pályán érkező jelek aktiválhatják az elsődleges és másodlagos testérző (szomatoszenzoros) kérget, valamint az insulát is. Ez azt jelenti, hogy az agy „regisztrálja", hogy a testet érte egy potenciálisan káros inger, ami azonban elmarad, az a fájdalom érzelmi (affektív) és motivációs integrációja. Az anterior cinguláris kéreg, az amigdala és az SN (salience network, ami az ingerekhez fontosságot rendel) elemei közötti koordináció altatás alatt súlyosan meggyengül, így nem jön létre az a globális riasztási állapot, amely normál ébrenlétben a szenvedés élményéhez és a viselkedéses elkerüléséhez vezetne. Röviden: fájdalomérzékelés lehet, szenvedés nincs.

Ugyanilyen fontos az emlékezeti konszolidáció aktív gátlása. Számos altatószer – különösen a propofol és a benzodiazepinek – kifejezett anterográd amnéziát okoz. A hippokampusz és a neokortikális hálózatok közötti információcsere romlik, és a GNW nem juttatja hozzáférhető állapotba az eseményt (mert hogy nem képes aktiválódni). Ennek következtében még akkor sem alakul ki epizodikus emlék, ha az inger bizonyos kérgi feldolgozási lépéseken áthaladt. A fájdalom tehát nem „eltörlődik", hanem soha nem válik olyan formátumúvá, amely emlékezeti nyommá rögzíthető lenne.
Felmerülhet a kérdés, hogy mindezek ellenére nem marad-e valamilyen stressz- vagy traumanyom a szervezetben. Rövid távú autonóm és hormonális stresszválasz valóban kialakulhat altatás alatt, például kortizolszint-emelkedés formájában, de ez nem azonos a

pszichológiai értelemben vett traumával. Traumatikus emlékhez szükség van a fenyegetés tudatos reprezentációjára, egy stabil önmodellre, amelyhez az esemény hozzáköthető, valamint időbeli integrációra, amely az élményt beágyazza az élettörténetbe. Az általános anesztézia éppen ezeket a komponenseket kapcsolja le, ezért normál körülmények között nem alakul ki poszttraumás emlékezeti nyom.
Ennek éles ellenpéldája a műtét alatti ébredés jelensége, amikor az anesztézia elégtelensége miatt a globális integráció és az affektív feldolgozás részben helyreáll. Ilyenkor a fájdalom nemcsak feldolgozódik, hanem tudatos élménnyé válik, és gyakran súlyos, tartós traumatikus emlék marad utána.

Ilyen emlékeknek tulajdoníthatóak azok a sajtóban szenzációként bemutatott esetek, amikor emberek elmesélik, hogy földönkívüliek ragadták el őket, testükbe mindenféle szondákat dugtak és kísérleteztek rajtuk. Sokukról kiderült, hogy életük során átestek már általános anasztézián, mely valószínűleg nem volt teljeskörű és traumatikus emléknyomok maradtak utána.



Elrabolt embereken kísérletet végző idegenek. Az ilyen álmok rosszu sikerült műtéti altatásból fakadó PTSD eredményei.

Ez a klinikai tapasztalat világosan mutatja, hogy nem a perifériás inger vagy a kérgi aktiváció számít önmagában, hanem az, hogy az esemény be tud-e lépni a tudat és az emlékezet globális architektúrájába.

Az altatásról szóló gondolat azzal folytatjuk mi az alatóorvos feladata, hogyan táncoltatja az agyat éber és kikapcsolt állapot között.

Szerző: **Gulyás Attila**

Nem alszik, nem éber, mi az? Egy speciális agyi állapot: az altatás II.

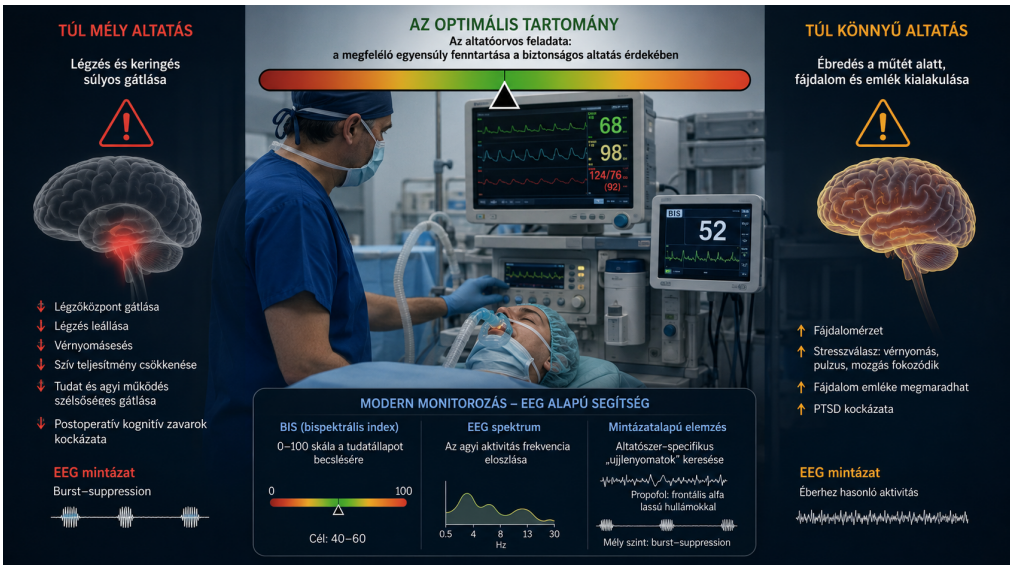
Az agyi összerendezettség vizsgálata az aneszteziológiai gyakorlatban is megjelent, különösen az altatás mélységének monitorozásában. Az altató orvos feladata hihetetlenül fontos és nehéz. A beteget az élet és a halál között kell tartania. Az altatószerek pontos adagolást igényelnek, hiszen „mérgezik” az agyi kapcsolatokat.

Pillanatról pillanatra megfelelő szinten kell tartani őket, alaposan előre gondolkodva. Az egyes emberek genetikus, és gyakran ebből fakadó személyiségtípus okokból, jelentősen máshogy reagálnak az altatókra. Egy stresszes embert sokkal veszélyesebb altatni, mint egy nyugodtat, mert az adrenalin pörgeti az éberséget elősegítő agyi rendszereket, amely ellen az altatóorvosnak dolgoznia kell. Egy tervezett műtét előtt az altatóorvos meglátogatja a beteget és elbeszélget vele. Ezalatt felméri milyen a vérmérséklete, mennyire feszült, van-e gyógyszerérzékenysége, altatták-e már. Ez alapján dönt arról milyen típusú és vélhetőleg mennyi altatószert kell használni az adott esetben. Túl sok altatóanyag hatására az

általános anesztézia kívánt hatása – a tudat és az integrált információfeldolgozás reverzibilis lekapcsolása átcsúszhat az alapvető életfenntartó rendszerek gátlásába. Túladagolás esetén az agytörzsi légzőközpontok aktivitása csökkenhet, ami a légzés leállásához vezet, miközben a keringési szabályozás is sérül: értágulat, vérnyomásesés és csökkent szívperctérfogat alakulhat ki. Kérgi és kéreg alatti szinten a túl mély altatásra már nem csak a tudatvesztés, hanem az idegi működés szélsőséges gátlása is megjelenik, amely tartós fennállás esetén összefüggésbe hozható posztoperatív kognitív zavarral, deliriumhajlammal és idős betegekben gyorsabb kognitív hanyatlással. A másik végletre is nagyon vigyázni kell, ha a beteg ébersége megnő a műtét alatt, komoly fájdalmakat érezhet, esetenként anélkül, hogy azt jelezni tudná. Ráadásul mivel agyi összhangja normális, a fájdalom emléke is megmarad, post traumás tüneteket (PTSD) okozva. Mivel a fájdalomérzet a gerincvelői és agytörzsi rendszerekben feldolgozásra kerül, általában (de nem mindig) a fájdalom érzékelésekor a klasszikus élettani paraméterek – vérnyomás, pulzus, mozgásos válasz megváltoznak. Régen csak ezekre a jelekre tudtak támaszkodni az altató orvosok.



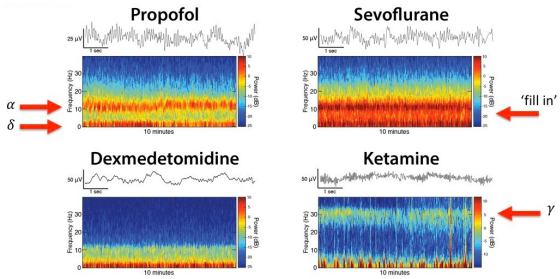
Az altató orvost kényes feladatában egyre fejlettebb műszerek segítik. Az agyterületek közötti összhangot vizsgálva az altatás megfelelő mélységben tartható.



Az altatás mélységét a megfelelő szinten kell tartani, mind az ébredés, mind a légzés és vérkeringés összeomlása komoly következményekkel járhat.

De ezek önmagukban nem adnak megbízható képet arról, hogy a beteg tudatállapota milyen. Ezért terjednek az EEG-alapú monitorozó rendszerek. A legismertebb közülük a bispektrális index, amely az EEG spektrális (frekvencia eloszlás) és fáziskapcsolati jellemzőiből számít egyetlen anesztézia értéket. Bár klinikailag hasznos, ma már egyre inkább nyilvánvalóak a korlátai, különösen bizonyos altatószerek esetében. Ezért terjed egy kifinomultabb, mintázatalapú EEG-értelmezés. Az aneszteziológusok egyre inkább altatószer-specifikus „ujjlenyomatokat" keresnek: például propofol alatt jellegzetes frontális alfa-ritmust lassú hullámokkal kombinálva, mélyebb szinteken „burst–suppression"

mintázatot. Ezek nem egyetlen számban összefoglalt indexek, hanem az idegrendszer aktuális dinamikáját tükröző jellegzetes állapotok. Kutatási környezetben megjelentek komplexitásalapú módszerek is, például a TMS–EEG-vel mért perturbációs komplexitási index, amelyek közvetlenebbül próbálják megragadni azt, ami altatás alatt eltűnik: a globálisan integrált válaszkészséget. Itt TMS-el (lásd Deheane kísérlet) „megpöccentik" az agyat, egyetlen pontban ingerlik, majd megnézik ez az inger hogyan terjed végig az agyi feldolgozási hierarchián. Az altatószer mennyiségét úgy kell beállítani, hogy se túl nagy, se túl kicsi ne legyen a terjedés csillapítása.



A különböző altatók másként szakítják meg az agyműködés összehangolását. Hatásukra az EEG ben jellegzetes változások következnek be.

Az egyes altatószerek hatásmechanizmusa jelentősen különbözik, ami tovább árnyalja a képet. A propofol, mint GABA-A-receptor agonista, kifejezetten hatékonyan bontja meg a fronto-parietális hálózatok közötti kommunikációt. EEG-n jól felismerhető mintázatokat hoz létre, és a tudatosság elvesztése viszonylag jól előre jelezhető módon követi az adagolást. Az altató gázok, mint a sevoflurán vagy az isoflurán (ősük a szeszélyes-veszélyes éter), több célponton hatnak, és hasonló hálózati szétesést okoznak, de mély altatásban gyakrabban okozzák, hogy az agy működése szétesik csendes szakaszokra és rövid aktivitási felvillanásokra. A ketamin egészen más képet mutat. NMDA-receptor antagonista hatása miatt nem feltétlenül csökkenti a kérgi aktivitást, sőt gyakran növeli a neurális zajt és a lokális aktivitást. A tudatosság itt nem egyszerűen „eltűnik", hanem dezorganizálódik: gazdag, de strukturálatlan belső élmények jelenhetnek meg, miközben a jelenthető tudat megszűnik. Ezért fordulhat elő, hogy a klasszikus EEG-indexek ketamin alatt félrevezetőek. A dexmedetomidin ezzel szemben inkább alvásszerű állapotot hoz létre, megőrizve bizonyos szenzoros feldolgozási és ébreszthetőségi jellemzőket, így átmenetet képez az alvás és a klasszikus általános anesztézia között.

Összességében a mai konszenzus szerint **az általános érzéstelenítés nem az agyi aktivitás megszüntetése, hanem az információ globális integrációjának célzott és reverzibilis szétesése.** A modern képalkotó és EEG-alapú módszerek ezt a hálózati szétesést teszik láthatóvá, míg az altatószerek különböző módokon, de ugyanarra a funkcionális végpontra hatnak: a tudat architektúrájának ideiglenes felbomlására.



Az általános anesztéziát egy társadalmi-politikai hasonlattal lehet jól szemléltetni. Képzeljünk el egy országot, ahol a média és a telekommunikáció az uralkodó párt kezében van, mely nem szeretné, hogy krízishelyzetben a polgárok összehangoltan tudjanak cselekedni. Csak egy kapcsolás, és míg a polgárok kis csoportokban helyileg tudják végezni a dolgukat, működnek a boltok, iskolák, gyárak, addig az emberek nem tudják megbeszélni egymással, hogy hol és mikor, mi ellen tüntessenek. Togo kormánya már 2017–2018-ban ideiglenesen lekapcsolta az internetet és WhatsApp-hoz való hozzáférést, hogy

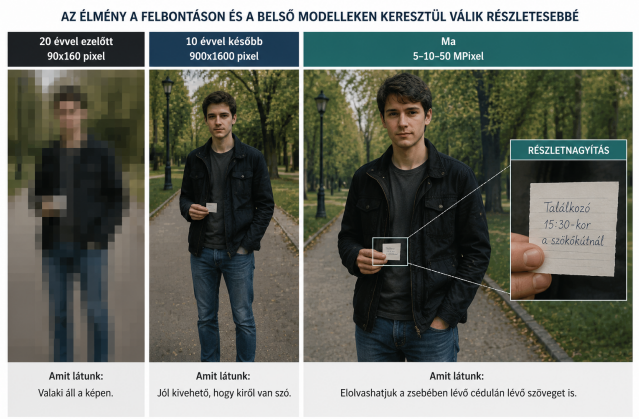
Az altatás és az ellenőrzött hírcsatornák hasonlósága.

meggátolja az ellenzéki szerveződést tömegtüntetések során. 2019 novemberében az iráni kormány egy teljes országos internetleállást rendelt el, amikor széleskörű tüntetések robbantak ki az üzemanyagárak emelkedése miatt. Hasonló lekapcsolás történt ugyanitt 2025 júniusában. Így egy igazságtalanság „fájdalma" nem jut el a tömegekhez, nem tudatosodik az országban a fájdalom, és nem kezdenek el a polgárok összehangoltan cselekedni. Szerencsére az elmúlt hetekben mifelénk felébredt a társadalom.

Szerző: **Gulyás Attila**

Állati tudatszintek és az „Umwelt"

Neurobiológia-neuropszichológia gondolatmenetünk alapján –miszerint a tudatélmény a hierarchikusan szervezett agyi modulok dinamikus kölcsönhatásából fakad– persze nyilvánvaló, hogy mivel az agyak mérete az evolúció során folyamatosan növekszik, a bennük kialakuló tudatélmény sem „nulla vagy semmi", hanem egy skálán helyezkedik el. Egy kutya nyilván gazdagabb tudatélménnyel rendelkezik, mint egy pocok, akinél kevesebb tudatélménnyel egy hal vagy egy csiga rendelkezhet.



A kamerák felbontásának növekedésével egyre több részletet tudunk meg a kép tárgyáról. Az evolúció során megjelenő egyre bonyolultabb agyakban is egyre kifinomultabb belső reprezentációk és ezért hatékonyabban használhatóbb modellek jelentek meg. Az összetettebb agyak gazdagabb tudatélményt generálnak.

Az élmény függ attól milyen felbontással érzékelünk, milyen összetettek a belső modellek és ezáltal hogyan éljük meg azokat. Egy 20 évvel ezelőtti mobiltelefonon készült kamera 90x160 pixeles fényképén annyit lehetett látni, hogy egy embert fényképeztek le. 10 évvel később, egy 900x1600 pixeles képen jól kivehető kiről van szó. Egy mai 5-10-50 Mpixeles képen elolvashatjuk a zsebében lévő cédulára írt szöveget is. De hasonló, egyre részletgazdagabb képeket kaptunk mondjuk a Plútóról. Először évtizedeken át egyetlen halvány fénypont volt, majd a földi mérések és a Hubble képei révén durva foltos felszínné vált, anélkül, hogy valódi „tájról" beszélhettünk volna. A döntő ugrást a 2015-ös New Horizons szonda hozta el, amikor tíz–száz méteres felbontásban aktív gleccsereket, hegységeket és összetett felszíni folyamatokat láttunk meg. A felbontás növekedése itt nem pusztán élesebb képet jelentett, hanem azt, hogy a Plútó egy elméleti objektumból geológiailag aktív világgá vált.
Nehéz elképzelni a törzsfejlődés mely szintjén kezdett el pislákolni az élmény lángja, mely lassan a tudatosság máglyájává vált, de gondolom már egy hangya, még inkább egy méh vagy egy hal rendelkezik olyan élményekkel, hogy jó-rossz, finom-mérgező, hideg-meleg. Ez aztán gazdagodik az élmények vonásaival. Ragozza mindenki a maga elképzelése szerint. Nyilván egy fontos elem a fájdalom megjelenése, mely nem csak az inger erősségét, hanem szubjektív tartalmát is minősíti és ezáltal igen hatékonyan annak elkerülésére trenírozza gazdáját.

> A 80as évek elején olvastam egy néhány oldalas novellát (sajnos már nem emlékszem a szerzőre és a címre), melyben egy kutató egy gépet szerkesztett, amivel egy éjjeli lepke agyában keletkezett élményeket tudta kiolvasni. A leírás nyelvezete zseniálisan

egyszerű és szemléletesen átélhető volt. A szöveg mely leírta, hogy a lepke végigrepült terráriumán és nekicsapódott az őt vonzó lámpának valahogy így hangzott:
„fény, melegebb, közelebb, akadály, ütés, fáj, de fény, fény”



Mit élhet át egy molylepke egyszerű agyával?

Ami fontos még, hogy nem csak a tudatállapot összetettsége, hanem egyedisége is fontos. Manapság meglehetősen tudatosnak tartjuk az újszájú ágon az emlősállatok (emberszabásúak, elefántok, cetek) mellett a madarakat (elsősorban a hollóféléket és a papagájokat), valamint az ősszájúak közül a lábasfejűeket (polipok, tintahalak) és fejlettebb rákokat (homár, languszta, tarisznyarák). Civilizáltabb társadalmakban már komoly szabályok vonatkoznak ezen állatok tartására és leölésük módjára.



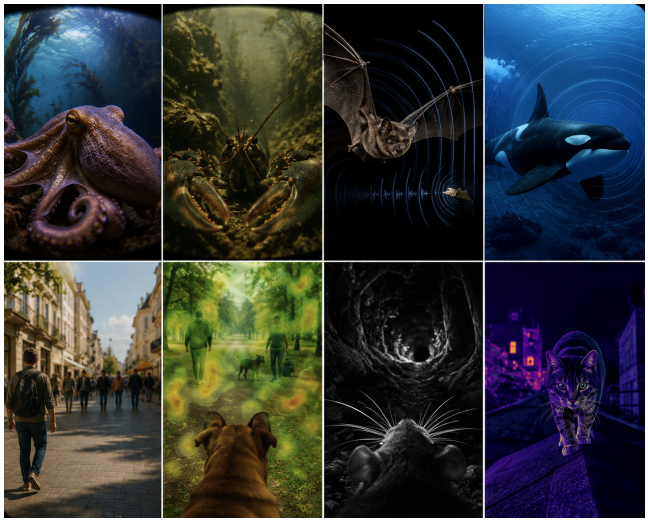
A meglehetősen fejlett tudattal, akár ÖN-tudattal is rendelkező állatok listája egyre bővül.

Mint az több, ismert és elismert könyv, tanulmány tárgyalta ezek a tudatok alapvetően eltérhetnek a mienktől, hiszen eltérő környezetekben, eltérő evolúciós hatások faragták őket, eltérő érzékszervekkel rendelkező, eltérő szerkezetű testekbe. Ezeket az egyedi érzékelési univerzumokat a német Umwelt szóval illetik. Egy igen jól látó 8 karú polip Umwelt-je biztos egészen más, mint egy tapogatókban bővelkedő homár, visszhangokkal világot építő denevér vagy gyilkos bálna világa.

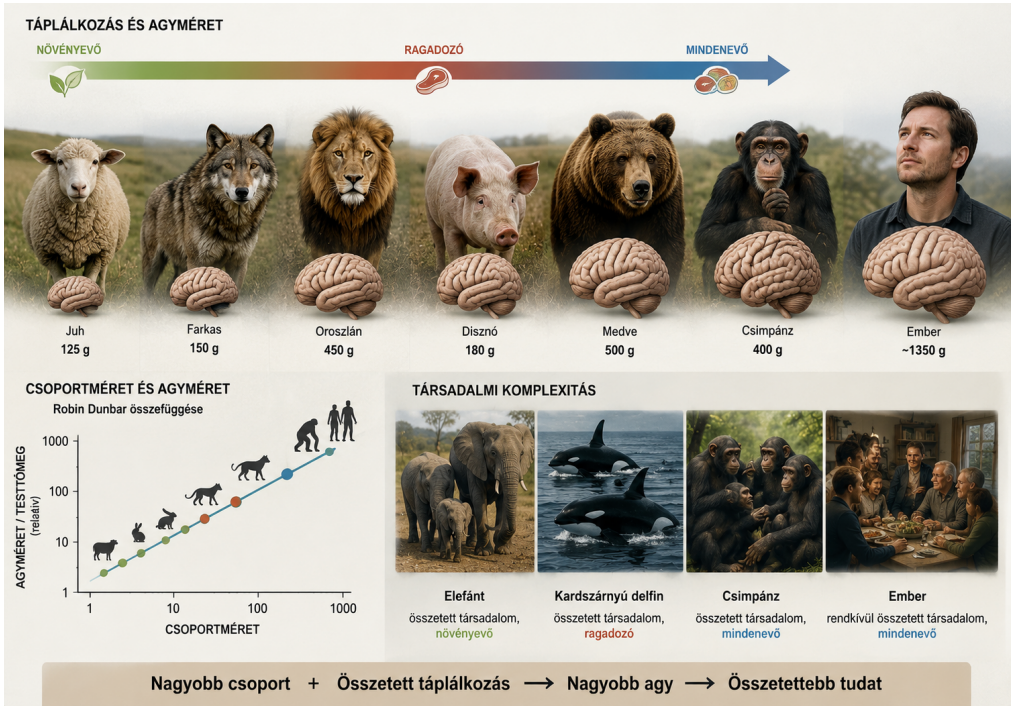
Ajánlott olvasmányok

Thomas Nagel – *„Milyen lehet denevérnek lenni?”*
Jakob von Uexküll – *„Élőlények környezeti világa”*
Donald Griffin – *„Hangok és visszhangok”*
Peter Godfrey-Smith – *„Más elmék”*
Ed Yong – *„Egy mérhetetlen világ”*

Emberi tudatunkat az határozza meg, hogy elsősorban a látásunkra támaszkodunk, jelentősen kevésbé a hallásunkra vagy a szaglásunkra. Egy kutya teljesen máshogy látja a világot, pontosabban máshogy szagolja, hiszem ez az elsődleges érzékszerve. A fotonok fénysebességgel közlekednek, azaz mi azonnal látjuk pontosan hol, mi történik. De azt már nem mit történt a ház túloldalán 10 perccel azelőtt. Egy szaglására támaszkodó állat a levegőben lassan, ide-oda sodródó, de sokáig időző kémiai nyomokat érzékeli. Amikor egy kutyát elviszünk sétálni, az a híreket olvassa, azért szalad fel-alá cikcakkokban, mert elcsípi egy 10 perce arra járt fajtárs vagy préda illatnyomának szalagját és elindul azon, a szagnyom erősödésének irányába. Közben megtudja, hogy aki hagyta, mennyi idős volt, mit evett, az ivari ciklusának milyen szakaszában van és hogy egészséges vagy beteg-e? Egy egér is teljesen máshogy látja, pontosabban bajszolja a világot. A kis rágcsálók elsődleges érzékszerve a testük szélességén túlnyúló bajszuk. Ezzel sötétben is érzékelik környezetüket, de nem csak passzívan, hanem aktívan, bajuszuk ritmikus előre-hátra lengetésével. Érzik üregük falát, az éjszakai erdő talaján kijárt ösvényük határát, de még a levegő rezgéseit is. A környezetet érintő bajuszszálak behajlása a tér dimenzióit, rezgése pedig az érintett felszínek tulajdonságait jelzi. Egy macska megint egy más keveréket használ. Látása jelentősen jobb mit a kutyáké, bajsza pedig, mint rágcsáló prédájáé, segít neki az éjszakai tájékozódásban. És akkor még nem beszéltünk kivételes hallásáról. Egy egyedileg felépülő világhoz, egyedi modellek és egyed tudatosodás is tartozik.



Az egyes állatok által megélt világ nemcsak összetettségében tér el, hanem abban is hogy milyen érzékszerveken keresztül merülnek el annak megismerésében.



Az agy és így a belső reprezentáció összetettségét meghatározza, hogy az állat milyen táplálkozási stratégiát (szakértlemet) igényel, illetve, hogy milyen összetett társas kapcsolatai

vannak. A mindenevő, nagy csoportokban élő ember agya a legnagyobb (testtömegéhez képest).

De egy tudat szerkezetét jelentősen meghatározza az is, hogy gazdája milyen közösségi modellben él. Robin Dunbar ismerte fel, hogy minél nagyobb csoportban él egy állat, annál nagyobb a testtömegéhez képest az agya. A társas kapcsolatok, a versengésből fakadó hierarchia betartása és kijátszása komoly agymunkát és szofisztikált világmodellt kíván. De az is befolyásolja az agy méretét, és így valószínűleg a tudat összetettségét, hogy mit eszik az állat. A növényevő-húsevő-mindenevő tengely mentén növekszik az agyméret. Egy növényevőt körülvesz a táplálék, ehhez nem kell sok agy, maximum ahhoz, hogy elszaladjon a ragadozó elől. A ragadozónak meg kell találnia prédáját, előre jeleznie viselkedését és a megfelel pillanatban gyorsan kell reagálnia, ehhez a testmérethez képest nagyobb agy kell. De a legnagyobb arányosított agyméretet a mindenevőknél (disznók, medvék, főemlősök) találjuk. Ez egy összetett szakma. Tudni kell mikor, hol, mit találunk, azt hogyan kell megszerezni, kinyitni. Ez egy biztonságos, de tudást igénylő stratégia, ha kell, váltani lehet egy másik táplálékra, de ehhez állandóan, kíváncsian kutatni és manipulálni kell a környezetet. Itt azért akad néhány kivétel, a növényevő elefántok és a ragadozó fogascetek agya is meglehetősen nagy. De itt az számít, hogy ők összetett társadalmakban élnek. A két hajtóerő, a mindenevőség és az összetett társadalom az ember (és az emberszabásúak) esetében összeadódik és hatalmas agyat eredményez.

Szerző: **Gulyás Attila**

Gyermekből felnőtt, a kamaszkor bökkenője

Még egy tudatállapotot befolyásoló dimenziót érintenünk kell. Ez pedig az idő, az életkor. Csecsemő-, gyermek-, serdülő-, felnőtt- és idős-korról beszélünk. A tagolás nem véletlen, hiszen más történik az egyes életszakaszokban, más feladatokat kell megoldanunk, ugyanarra a feladatra más döntéseket kell hoznunk. Ez így megy az élővilágban, kb. a többsejtűség kialakulása óta, úgy 1.2 milliárd - 700 millió éve. Azóta vannak eltérő korú, életfázisú egyedek. Azelőtt csak sejtek voltak, amik osztódtak, aztán kezdték elölről, nem öregedtek, nem haltak meg, legfeljebb megette őket valaki.



Életünk korszakokra tagozódik. Az egyes korszakokban más testben más feladatokat kell agyunknak megvalósítania, ezért agyunkban komoly átalakulások zajlanak, elsősorban kamaszkorban.

Az evolúció belénk-faragott életkor függően kifejeződő géneket, melyek az adott időszakokban segítenek megoldani problémáinkat. Egy csecsemő-gyermek feladata, hogy megtanuljon táplálkozni, látni, mozogni, fogni, futni, túlélni, tanulni. Ez meglehetősen eltér azoktól a feladatoktól, amit egy felnőtt agynak kell jól csinálnia: legyen mit ennünk, hol laknunk, a gyerekek maradjanak életben, azaz tervezzünk, mérlegeljünk, kételkedjünk, tanítsunk. Idős korunkban pedig azzal segítjük társainkat, hogy emlékszünk arra, réges-régen egy katasztrófa idején mi volt a túléléshez vezető megoldás. Agyunk moduljai az egyes korszakokban más hálózatokat alkotnak és eltérő erősséggel kapcsolódnak össze.
A bökkenő ott van, hogy egyszercsak eljön az a hormonális nyomás, hogy a gyerek agynak

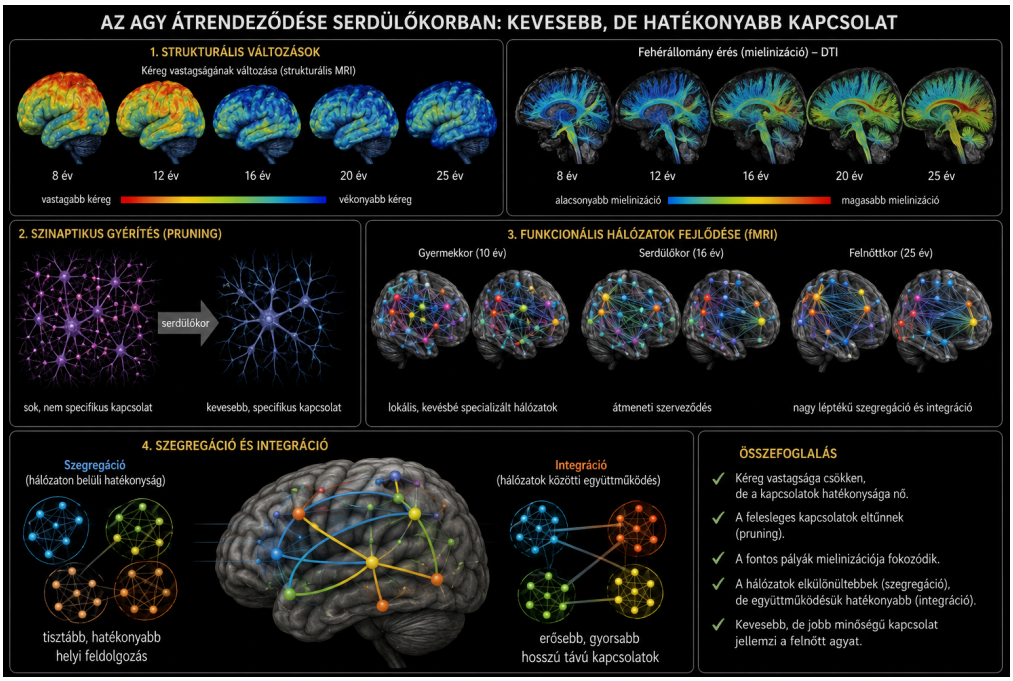
el kell kezdenie felnőtt aggyá válni. A rovarok egy ilyen érzékeny átmenetet a mozdulatlan báb-állapot közbeiktatásával vészelik át. A zabálógép-hernyó bebábozódik, teste feloldódik és kialakulnak egy lepke vagy bogár részei, hogy az majd a párkereséshez és peterakáshoz ki tudjon repülni. A gond ott van, hogy egy embergyereknek nem csak a testét, hanem a tudását is át kell alakítania ahhoz, hogy felnőttként helytálljon. Azaz nem gubódzhat be, pl. a szobájába (bár egyre többen ezt csinálják manapság, amitől nem is lesznek belőlük jól működő felnőttek), mert tanulnia kell. Ahogy a kamaszkorban beindulnak a hormonok, ugyanúgy agyunkban is számos gén kapcsol ki meg be.



A gyermeki agynak teljesen más feladatokat kell megoldania, mint egy felnőtt agynak. Ehhez az agynak át kell alakulnia. Ez egy meglehetősen bonyolult és kényes építkezés, ami kamaszkorban történik és hasonlít ahhoz amikor egy hernyó bebábozódik, hogy majd gyönyörű lepkeként szárnyaljon.

Ennek az eredménye az, hogy agyunk moduljai és a köztük lévő kapcsolatok elkezdenek megváltozni, hogy más módon dolgozzuk fel a világ ingereit. Strukturális szinten ez többek között a szinaptikus „gyérítésben" (synaptic pruning) és a fehérállományi pályák mielinizációjának fokozódásában jelenik meg. Strukturális MRI-vel mérve a kéreg vastagsága sok területen csökken, miközben a hatékonyabb hosszú távú kapcsolatok erősödnek (agyunk egy zárt tér, térfogata nem változhat, hely kell a fehér állománynak, pont jó, hogy kicsit zsugorodik a szürke). Az átrendeződés funkcionális MRI vizsgálatokban is látszik. Különböző életkorban másképpen kapcsolódnak hálózatokba az agyterületek és máshogy váltják egymást a funkcionális hálózatok. Gyermekkorban a hálózatok inkább lokálisak és kevésbé specializáltak, serdülőkorban pedig nő a nagy léptékű hálózatok közötti szegregáció és integráció. Ez elsőre ellentmondásosnak tűnhet: hogyan lehet egyszerre az, hogy a hálózatok jobban elkülönülnek (szegregáció), miközben az együttműködésük is javul (integráció)? A válasz az, hogy nem ugyanazok a kapcsolatok erősödnek és gyengülnek. A fejlődés során a „zajos", nem specifikus kapcsolatok egy része eltűnik (szinaptikus metszés), így a hálózatokon belüli együttműködés tisztábbá válik – ez a szegregáció. Ugyanakkor a megmaradó, fontos hosszú távú kapcsolatok (például a homloklebeny és más területek között) megerősödnek és gyorsabbá válnak (mielinizáció), így amikor szükség van rá, a különböző hálózatok hatékonyabban tudnak együtt dolgozni – ez az integráció. Röviden: kevesebb, de jobb minőségű kapcsolat jellemzi a felnőtt agyat.

Kevésbé kaotikussá, véletlenszerűvé válnak a lehetséges funkcionális kapcsolatok, pontosabban és kiszámíthatóbb módon kezdenek el működni és kölcsönhatni a hálózatok, mint gyermekkorban. Pontosabban meghatározottak lesznek a váltások. Például a default



Az agy szerveződésének változása a felnőtté válás során. A kishálózatok hatékonyabban kezdenek el működni és meta szinten nő a kapcsolatok együttműködése.

mode network (DMN) és a frontoparietális kontroll hálózat (FPCN) közötti elkülönülés és koordináció fokozatosan erősödik (az Én kevésbé szól bele a cselekedeteinkbe). Az agyban a legtöbb szinapszis a gyermekkor végén található, majd a szinapszisszám csökken. Ennek oka az, hogy először kialakul rengeteg lehetséges kölcsönhatás (modellek), majd ezek közül a fontosabbak megerősödnek, megmaradnak. Így tehát van egy jellegzetes késő gyermekkori és egy jellegzetes felnőtt mintázat, ezek között kell átevickélnie a serdülő agynak.

A változásnak két folyománya van. Egyrészt, hogy vannak életkorhoz kapcsolódóan megjelenő és eltűnő betegségek. Sok kisgyermek kinövi epilepsziáját, mert pl. egy gyerekkorban hibás ioncsatorna gén felnőtt változata már jól működik. De gyakran nem gén vált, hanem az adott ioncsatorna-összetétel, kifejeződési arány vagy hálózati környezet alakul át. De sajnos a kamaszkor, fiatal felnőtt kor az, amikor többek között megjelenhet pl. a skizofrénia. Ezt részben azzal hozzák összefüggésbe, hogy a serdülőkori szinaptikus átrendeződés és a dopaminrendszer szabályozásának változásai kritikus időszakot hoznak létre a sérülékenység szempontjából.

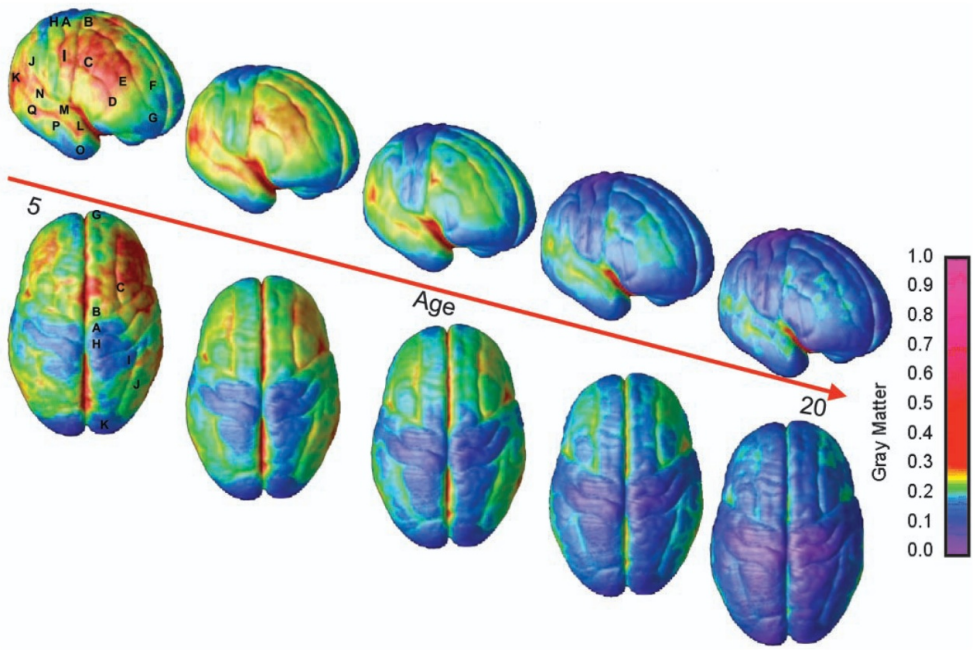


Az agy serdülőkori átalakulása miatt gyerekkori betegségek múlhatnak el és felnőttekre jellemző betegségek jelenhetnek meg.

A másik, mindannyiunkat érintő folyomány, hogy életünk egy szakaszában, agyunk elkezd felnőtté válni. Mivel jár ez? Miben más a felnőtt agy, mint a gyerek agy? Egy felnőttnek meg kell találni a helyét a világban, a társadalomban. Ki kell alakítanunk elképzelésinket, terveinket, miben legyünk ügyesek. Mivel társadalomban élünk és eljön az ideje, hogy a családot felváltsa a közösség, csatlakozni kell egy csapathoz, egy kollektívához, nézetrendszerhez, akikkel a terveket majd megvalósítjuk. Mindkettőnek része az is, hogy megmutassuk képességeinket, bátorságunkat, erőnket. Serdülőkorban különösen felerősödik a társas visszajelzések iránti érzékenység. Képalkotó vizsgálatok szerint a jutalomfeldolgozásban szerepet játszó striátum (különösen a nucleus accumbens) erősebben reagál társas és kockázatos helyzetekben. Aki épp nem kamasz (még nem vagy már nem) próbálja meg magát ebbe a helyzetbe képzelni. Éltünk, mint gyermekek, szüleink vigyáztak ránk, terelgettek, kaptunk enni stb. Most, egyszercsak azt kezdjük érezni, hogy a világ bizonytalan, nekünk kell kitalálni mi legyen és még közben a szüleink bele is szólnak mindenbe, mert olyan rettentően okosnak gondolják magukat. Se nekünk, se nekik nem könnyű.



Gyermekként tanulnunk kell, kamaszként kibogozni a világ nagy kérdéseit és egy csoporthoz tartozni, felnőttként pedig gyermekeim számára megteremteni a biztonságot.

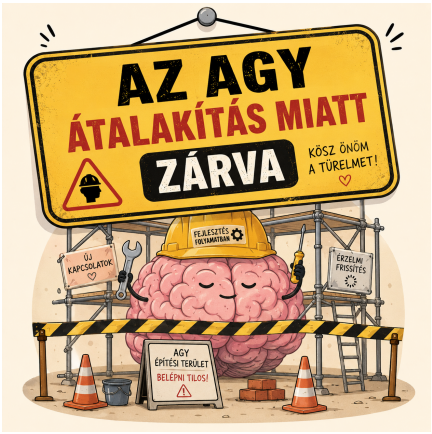


Az agy érése hátulról előre halad. Az ábrán a fejlődő agy szürkeállományának viszonylagos vastagsága látszik (piros vastagabb, kék vékonyabb) jobbról és felülről nézve, az életkor függvényében. Furcsa módon a fejlődést itt a szürkeállomány vékonyodása jelenti, ugyanis hatékonyabbak lesznek a kapcsolatok a kishálózatokban, viszont megnő és több helyet foglal a meta-hálózat összeöttetéseit adó fehérállomány.

Sajnos a kamaszkori komoly gondokra még rátesz egy lapáttal, hogy az agy érése a hátsó része felől az első része felé halad. Ugyanis az evolúció során is így fejlődtek a dolgok,

először a modalitások moduláris feldolgozása alakult ki (tarkó, halánték, fali, lebeny, amigdala), majd ezután a koponya elején a fejlett asszociatív homloklebeny. Amikor a felnőtté-érés megindul az agyban, a szándékok, hevületek, érzések meglehetősen gyorsan elkezdenek átalakulni, de az ezek féken tartásáért, a mérlegeléséért felelős homloklebeny területek még csak a gyerekcipőt fűzögetik. Ez részben a prefrontális kéreg késői érésével és a frontális–striátális körök fokozatos finomodásával magyarázható. Nincs, aki féken tartsa az elharapódzó, szikrákat hányó amigdalát.

Pontosabban, a szabályozás nem hiányzik, hanem kevésbé stabil és kontextusfüggő, különösen érzelmileg telített vagy társas helyzetekben. A metamorfózisban szenvedő serdülők óvatosság és körültekintés nélkül akarják megmutatni, hogy mit tudnak, mit mernek és milyen extrém csoporttal azonosítják magukat. Ez összefügg azzal is, hogy a jutalom- és motivációs rendszerek érzékenyebbek, míg a hosszú távú következmények mérlegelése később stabilizálódik. Ezért népszerű a Darwin díjasokat termelő Jackass sorozat a kamaszok körében. Mindenki csak reménykedhet, hogy a homloklebeny még valami nagyobb baj bekövetkezte előtt képes lesz úrrá lenni a helyzeten. Ugyanakkor fontos, hogy ez az időszak nem pusztán „hiba”, hanem adaptív is: a fokozott exploráció, kockázatvállalás és társas orientáció evolúciós szempontból elősegíti az önállósodást és a csoportba illeszkedést.



Nehéz a döntés kamaszkorban, mert meg akarunk felelni kortársainkban, egy csapat részei akarunk lenni, mindeközben még nem rendelkezünk az óvatos kételkedés képességével.

Szerző: **Gulyás Attila**

Ki az az ÉN?

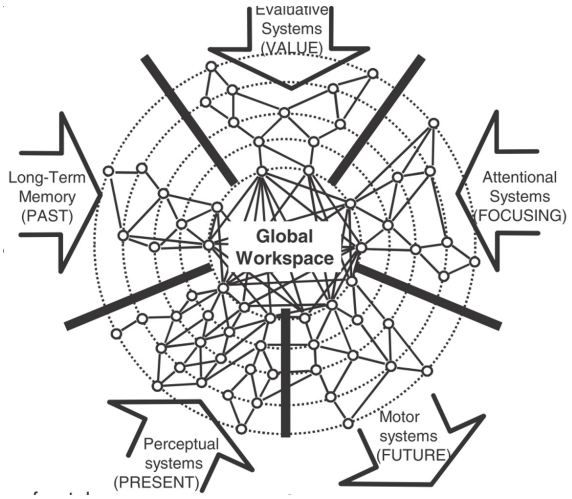
És akkor az emberiség nagy kérdése. Ki vagyok én? Mi az az ÉN? Descartes „Gondolkodom tehát vagyok” kijelentését átfogalmazva: Modulokban működő agyam pillanatról-pillanatra változó mintázatai által kialakított film vagyok. Vagy rövidebben az Én: Egymástól függetlenül működő alrendszerek kommunikációjának átélése.



Az Én, az Éntudat több mint a tudatos élmény. Az én nem a tudat előfeltétele, és nem a tudat, hanem annak egyik lehetséges szerveződési módja, amely erősen jelen van a hétköznapi működésben, de nem szükséges eleme a tudatnak. Tudatos élményünk pillanatról pillanatra változik, külső (képek, hangok, történések) és belső (érzések, gondolatok, feladatok, motivációk) ingerek kerülnek a tudatosságunkat megalapozó GNW-be. Ez egy kavargás, melyben csak az képvisel valamelyes állandóságot, hogy korábban megszilárdult belső reprezentációink aktiválódnak újra és újra. De az énélményben ennél több állandóság van. Agyunk meglehetősen gyakran foglalkozik korábbi emlékeink és aktuális problémáink előhívásával. Ilyenkor aktiválódik az fMRI-vel

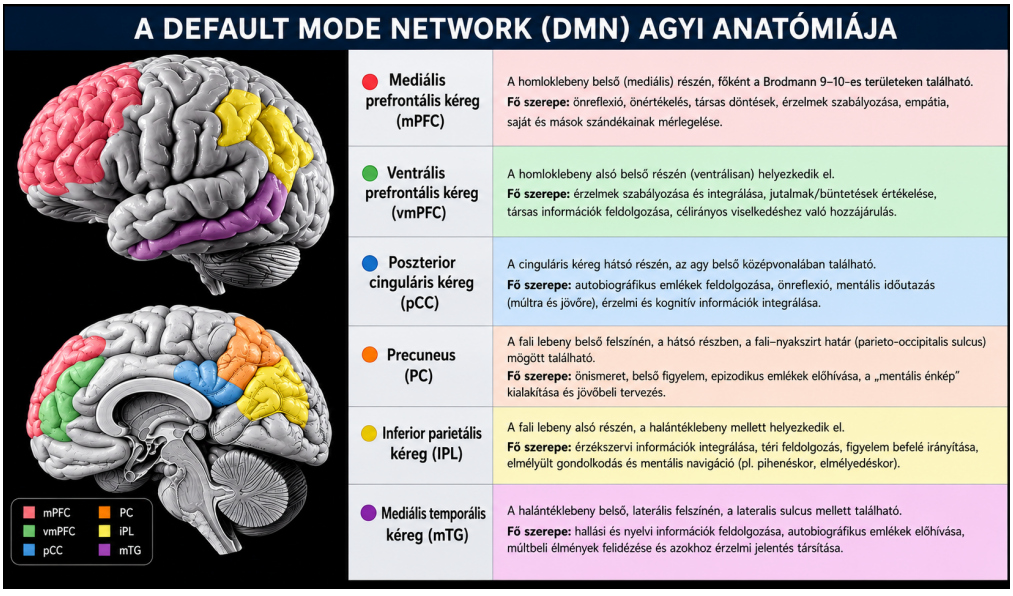
leggyakrabban azonosított funkcionális hálózat, melyet pont amiatt neveztek el DMN-nek („default mode network”, alapértelmezett hálózatnak), mert az épp magára hagyott agy leggyakrabban ehhez a hálózathoz, működési módhoz tér vissza.

Az Én és az énélmény tárgyalásakor tehát, a fentiek fényében, **érdemes rögtön szétválasztani két, gyakran összemosott szintet**. Az egyik **a tudatos élmény pillanatnyi tartalma**: az, ami éppen „a fejünkben van”, és amit a GNW elmélete jól megragad, mint dinamikusan versengő, gyorsan cserélődő reprezentációk ideiglenes globális hozzáférését. A másik viszont **az Én élménye, mint viszonylagos állandóság:** az a tapasztalat, hogy ezek a változó tartalmak „velem történnek”, hogy egyetlen testhez, egyetlen múltbeli folytonossághoz és egyetlen perspektívához kötődnek. Az Én, ebben az értelemben nem egyszerűen egy tartalom a tudatban, hanem egy szervező keret, egy folytatásos mese, amely időben, testben és élettörténetben integrálja a tudatos élményeket.



A GNWbe kapcsolódó agyi rendszerek. A perceptuális (érzékelő) rendszerek és a kiértékelő rendszerek a JELENRŐL szolgáltatnak információt, a figyelmi rendszerek fókuszt adnak, a memória rendszerek a MÚLT tapasztalatait (mit tudok, ki vagyok) adják hozzá a tudatállapothoz és ennek alapján a motoros/tervező rendszer a fenti megfelelő kontextusban dönt, határozza meg a JÖVŐt. Ezek mind hozzájárulnak Én élményünkhöz. A GNW tartalma pillanatról-pillanatra változik, attól függően melyik agyi funkcionális hálózat aktív éppen.

A GNW szempontjából a tudatosság eseményszerű: külső ingerek, belső gondolatok, érzelmi állapotok vagy aktuális feladatok váltanak ki globális „gyújtást”, amely során egy reprezentáció széles kérgi hálózatok számára válik hozzáférhetővé. Ez a mechanizmus azonban önmagában nem magyarázza meg, miért nem esik szét az élményvilágunk egymástól független epizódokra. Az Én élményéhez olyan hálózatokra van szükség, amelyek nem a gyors érzékelés-gondolkodás váltásra kihegyezettek, hanem a lassabb, összegző, önmagára hivatkozó feldolgozásra.



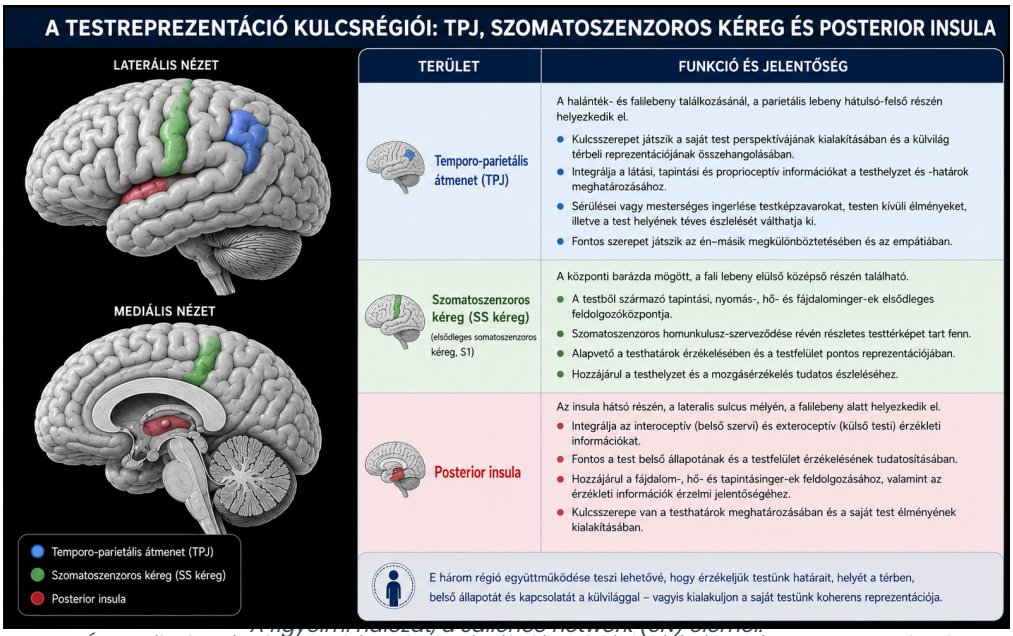
A Én kialakításában fontos szerepet játszó Default Mode Network (DMN) anatómiája

Ebben a kontextusban kerül előtérbe a DMN. Ez a hálózat ugye akkor mutat fokozott aktivitást, amikor az egyén nem végez külső feladatra irányuló figyelmet igénylő tevékenységet, hanem „magára van hagyva" emlékezik, tervez, fantáziál, „önéletrajzi rövidfilmeket" futtat. A DMN magterületei közé tartozik a mediális prefrontális kéreg (mPFC), a posterior cinguláris kéreg és precuneus, valamint a laterális parietális kéreg egyes részei (angularis gyrus). Ezek a területek szoros kapcsolatban állnak a hippokampális–mediális temporális struktúrákkal, amelyek az epizodikus emlékezet előhívásában és rekonstrukciójában kulcsszerepet játszanak. Az mPFC különösen erősen kötődik az önreferenciális feldolgozáshoz: itt aktiválódnak azok a reprezentációk, amelyek saját tulajdonságainkra, szándékainkra, értékeinkre vonatkoznak. A posterior cinguláris kéreg és a precuneus ezzel szemben inkább az integrációs funkciókban tűnnek ki: ezek a régiók kapcsolják össze az aktuális mentális állapotot a személyes múlt epizódjaival, és segítenek fenntartani az „én ugyanaz vagyok, mint tegnap" élményét. A DMN tehát nem egyszerűen „üresjárat", hanem az én-narratíva folyamatos karbantartásának hálózata.

> És itt dobom be, hogy micsoda személyiségfejlődés romboló hatása van az okosotelefon függőségnek. Ha egy fejlődő agyat, arra treníroznak a szociális média applikációk, hogy az megállás nélkül 2-5 másodperces értelmetlen videókat scrollozzon és like-oljon, nem lesz ideje arra, hogy „unatkozzon", hogy beinduljon benne a DMN, és ezáltal önmagát fejlessze. Inger vezérelt lesz, mint egy skinneri dobozban a pedálnyomogató patkányt, aki a lámpa felvillanását várja, mert akkor, ha megnyomja a pedált, ételt vagy az örömközpont ingerlését kapja. Az emberi agy fejlődésének lényege, hogy nem inger vezérlet, hanem belső állapot vezérelt. Ha állandóan ingerekkel bombázzuk (ráadásul teljesen haszontalanokkal), akkor inger vezérelt marad és nem lesz képes belülre figyelni, fejlődni.

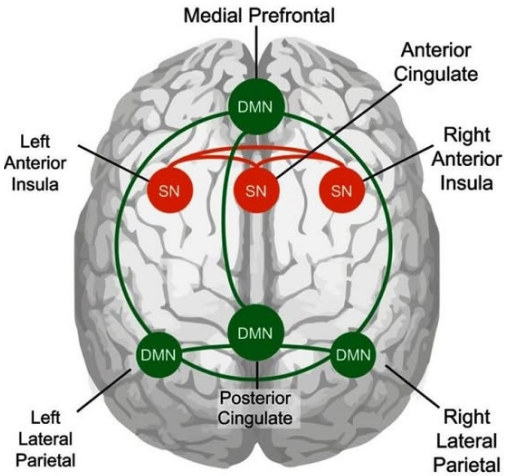
Az énélmény azonban nem merül ki az élettörténeti és kognitív aspektusokban. Legalább ilyen fontos a testhez kötöttség, a testhatárok és a testi állapotok folyamatos monitorozása. Ebben egy másik agyi funkcionális hálózat, az SN („salience network", egy inger feltűnőségét/jelentőségét értékelő hálózat)– különösen az anterior insula és az anterior cinguláris kéreg – játszik központi szerepet.Az insula az interoceptív (a belső megfigyelése) információk elsődleges kérgi központja. Ide futnak be a zsigeri állapotokra, a fájdalomra, a hőmérsékletre és az általános testi komfortérzetre vonatkozó jelek. Ezek az információk adják azt az alapérzést, hogy „itt vagyok ebben a testben". Az anterior cinguláris kéreg ehhez érzelmeket és cselekvési késztetéseket társít, összekötve a testi állapotokat a viselkedéssel.

Mint később megbeszéljük, az AI tudatosságához vezető egyik nagy akadálynak azt tartom, hogy a testben élés („embodiment") és a testi igényekből az evolúció által faragott motivációk, egyelőre nincsenek jelen ezekben a rendszerekben. Nincsen testem, nincs mit félteni. A testhatárok érzékelésében és a saját test reprezentációjában további kulcsszerepet játszanak a szomatoszenzoros kéreg, a posterior insula, valamint a temporo-parietális átmenet (TPJ). Az utóbbi különösen érdekes abból a szempontból, hogy sérülései vagy mesterséges ingerlése testképzavarokat, testen kívüli élményeket válthat ki. Ez arra utal, hogy ez a régió kritikus a saját test perspektívájának és a külvilág térbeli reprezentációjának összehangolásában.
Az időbeli integritás –annak élménye, hogy az Én nemcsak térben, hanem időben is folytonos– annak köszönhető, hogy a DMN gyakran meghívja a hippokampuszt (autobiografikus/életrajzi memória) a GNW-be. Az epizodikus emlékezet így nem pusztán múltbeli események tárolása, hanem aktív rekonstrukció, amely során a múlt tapasztalatai folyamatosan újraértelmeződnek az aktuális állapot fényében. Ez a rekonstruktív folyamat teszi lehetővé a jövő szimulációját is: ugyanazok a hálózatok aktiválódnak, amikor



Az Én egyik elemének, a testképnek-testérzékelésnek kialakításában fontos agyterületek.

visszaemlékezünk és amikor előre tervezünk. Az Én így nem állandó entitás, hanem egy időben kiterjedt modell, amely a múltból táplálkozik és a jövő felé orientál.
Fontos hangsúlyozni, hogy ezek a hálózatok nem elszigetelten működnek. Az Én élménye éppen abból a dinamikus egyensúlyból születik, amelyben a GNW által közvetített pillanatnyi tudatos tartalmak, a DMN által fenntartott ön-narratíva, valamint a salience (feltűnőség) és szenzomotoros (érző-mzgató) hálózatok testi beágyazottsága folyamatos kölcsönhatásban állnak. Amikor ez az egyensúly felborul – például depresszióban, deperszonalizációban (amikor az ember úgy éli meg, mintha kívülről figyelné önmagát, elveszítené a kapcsolatot saját érzéseivel és testével) vagy egyes pszichiátriai kórképekben –, az Én élménye is torzul: túl merevvé, túl ruminatívvá vagy éppen túl bizonytalanná válik.



A kiegyensúlyozott ÉN élményhez két funkcionális agyi hálózatnak, a DMN-nek és az SN-nek kell kiegyensúlyozottan együttműködnie.

Összefoglalva, az eddig használt szemléletmód (szintek, modularitás, hierarchia, visszacsatolás) fényében, nem meglepő módon, az Én élménye nem helyezhető egyetlen „én-központba" az agyban. Inkább egy több hálózatra kiterjedő, sok szinten szerveződő folyamat, amelyben a tudatos élmény gyors váltakozása fölött egy lassabb, összekapcsoló rendszer biztosítja a személyes állandóságot. Ez az állandóság nem abszolút, nem állandó, hanem folyamatosan újraszervezett.

Ha a mai Énünket szembesítenénk 10 évvel ezelőtti Énünkkel, lehet nem ismernénk magunkra, meglehetősen meglepődnénk, esetleg vitába szállnánk magunkkal. Ami nem lenne baj, az Én önmagával való vitatkozása normális és szükséges a helyes gondolkodáshoz. Lásd az esetet amikor az utcán sétálva elmész a cukrászda előtt és meglátsz egy kívánatos Őrség aranya tortát. Agyad, moduljaid, Éned egyik része azt



Az Énem akkor és most. Vitába szállnának!

mondja: „Hú de finom, együk meg!”, egy másik modulod, Éned másik része brutálisan óvatosságra int: „De hát kövér vagy mint egy disznó, nem kellene megenni!”. Aztán elkezdődik egy mentális birkózás, aminek általában az állatibb, „együk meg a tortát” frakciója győz. Ez a törékeny, mégis meglepően stabil konstrukció az, amit a hétköznapi tapasztalat szintjén Énnek nevezünk. És mint az előző bejegyzésekben láttuk ez az összetettségből fakadó törékenység vezet megváltozott egészséges vagy patológiás Én és tudatállapotokhoz. Van, aki például saját magával száll vitába, Énje hasadt, több eltérő személyiségből is állhat.

Szerző: **Gulyás Attila**

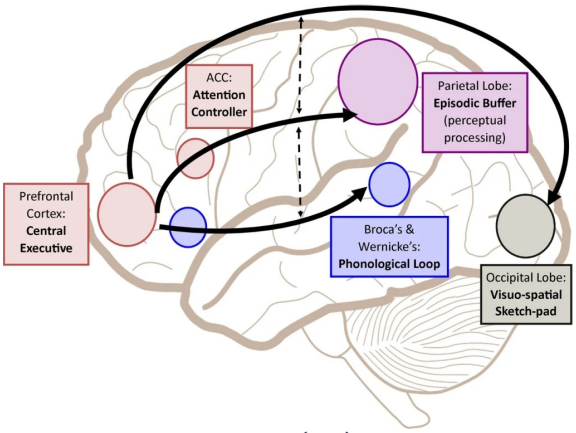
A vezérfonál, ami gyakran korbács

Van még egy kérdés, amit az Én kapcsán körbe kell járnunk. Mint láttuk, Énünk egyik alapeleme, hogy van benne egy a múltból a jövőbe húzódó fonál. Ennek szerves részét képezik motivációink, feladataink, „To Do” listáink. A kérdés itt az, hogy: Tudjuk-e mely agyterületek felelősek az aktualitásokért és a hosszabb távú megoldandó problémák listázásáért?



Énünk gerince a múlt tapasztalataiból és emlékeiből valamint rövid és hosszútávú terveinkből, motivációinkból áll össze.

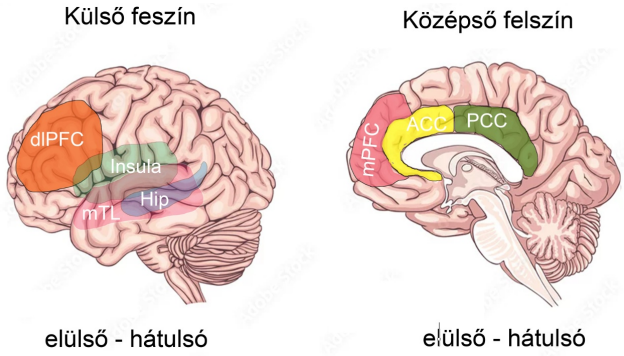
A válasz –az eddigiek után nem váratlanul– az, hogy nincs egyetlen „aktualitás-központ" vagy „feladatlista-raktár" az agyban, de meglepően jól körülírható, mely hálózatok és csomópontok együttese felel azért, hogy a megoldandó problémák „észben legyenek", újra és újra felbukkanjanak, és ne vesszenek el. A modern kép inkább elosztott, dinamikus munkamegosztás, mint lokalizált funkció.



A fronto-parietális hálózat (FPN) teszi lehetővé, hogy figyelmünket a lényeges dolgokra irányítsuk. Ez a hálózat nem egyszerűen kiválasztja, mi fontos számunkra, hanem aktívan befolyásolja azt is, hogyan értelmezzük és dolgozzuk fel a külvilágból érkező információkat.

Az „aktualitások" – vagyis azok a dolgok, amelyekről úgy érezzük, hogy most fontosak, megoldásra várnak, nem hagynak nyugodni – elsődlegesen a DMN és a FPCN határán szerveződnek. A DMN mediális prefrontális és posterior cinguláris régiói folyamatosan újraaktiválják a személyes célokhoz, nyitott kérdésekhez és jövőbeli tervekhez kapcsolódó reprezentációkat. Ez magyarázza, hogy miért bukkannak fel „maguktól" problémák nyugalmi állapotban, zuhanyzás közben, meditáció alatt vagy elalvás előtt. A DMN nem megold, hanem felszínen tart.

A tényleges „lista-jelleg" – vagyis, hogy több megoldandó dolog egymás mellett jelen legyen, rangsorolható legyen, és váltani tudjunk köztük, már inkább a dorsolaterális prefrontális kéreghez és a hozzá kapcsolódó fronto-parietális hálózathoz köthető. Ez a rendszer felel a munkamemóriáért, a prioritások ideiglenes fenntartásáért és a „mi következik most?" típusú kérdésekért. Itt nem tartós tárolás történik, hanem aktív karbantartás, ami ebben a rendszerben van, az „aktuális feladatként" élhető meg. Különösen fontos szereplő az anterior cinguláris kéreg (ACC), amely a **problémák „nyomásérzetéért" felel.** Az ACC érzékeny a konfliktusra, a befejezetlenségre és a hibalehetőségre, ezért ez a terület járul hozzá ahhoz az élményhez, hogy „ezzel még dolgom van". Ha ez a rendszer túlműködik, az aktuális problémák tolakodóvá válnak; ha alulműködik, a feladatok elveszítik sürgető jellegüket. Az insula ehhez **testi és affektív színezést ad**. Ez a régió közvetíti azt az érzést, hogy egy megoldandó probléma nemcsak kognitív kérdés, hanem „rosszul esik", „feszít", „nem hagy nyugodni". Emiatt az aktualitások nem puszta listaként jelennek meg, hanem érzelmileg terhelt egységekként. A hippokampusz és a mediális temporális lebeny ehhez **kontextust és időbeliséget ad.** Ezek a struktúrák kapcsolják össze az aktuális problémákat korábbi



A szövegben említett területek elhelyezkedése. A halvány területek vagy az agy mélyében vagy nem látható felszínén helyezkednek el (insula, hippocampus és a mTL).

eseményekkel („honnan indult ez?”) és jövőbeli forgatókönyvekkel („mi lesz, ha nem oldom meg?”). Emiatt az aktualitások gyakran narratív formában térnek vissza, nem egyszerű kipipálandó pontokként.
Fontos hangsúlyozni, hogy ez a „lista” nem állandó. Amit aktualitásként élünk meg, az attól függ, hogy az SN – különösen az insula és az ACC – **mit jelöl ki relevánsnak** az adott pillanatban. Ezért változik a problémák listája stressz, fáradtság, meditáció vagy alvás után: nem a memória tartalma változik, hanem az, mi kap hozzáférést és érzelmi súlyt. Az élmény, hogy „túl sok minden van a fejemben”, nem memóriahiba, hanem hálózati túlsúly – túl sok tartalom kap egyszerre globális hozzáférést.

A fenti rendszerek felelősek tehát rövid és hosszútávú motivációinkért, aggodalmainkért. Ezek a funkciók nyilván fontosak voltak ahhoz, hogy sikeres Homo sapienssé váljunk, de ugyanakkor mai túlhajszolt világunkban sok problémát okozhatnak. Ha a „lista-mechanizmus” túl hangossá válik szoronghatunk vagy kényszeresek lehetünk. Meditálás hatására pedig elcsendesedhet.

Szerző: **Gulyás Attila**

A piros pirosa. Mik azok a kváliák és honnan jönnek?

Az ÉN boncolása végén elkerülhetetlen, hogy az agykutatás és tudat filozófia legnehezebb kérdését – David Chalmers után: „The hard problem of consciousness”-t, A tudat nehéz problémáját is megemlítsük. Honnan jön a belső élmény, az ÉN élménye a világ dolgainak színes-szagos érzékelése? Miért nem csak egy automata zombiként cselekszünk belső világ és érzelmek nélkül? elméletileg úgy is lehetne.

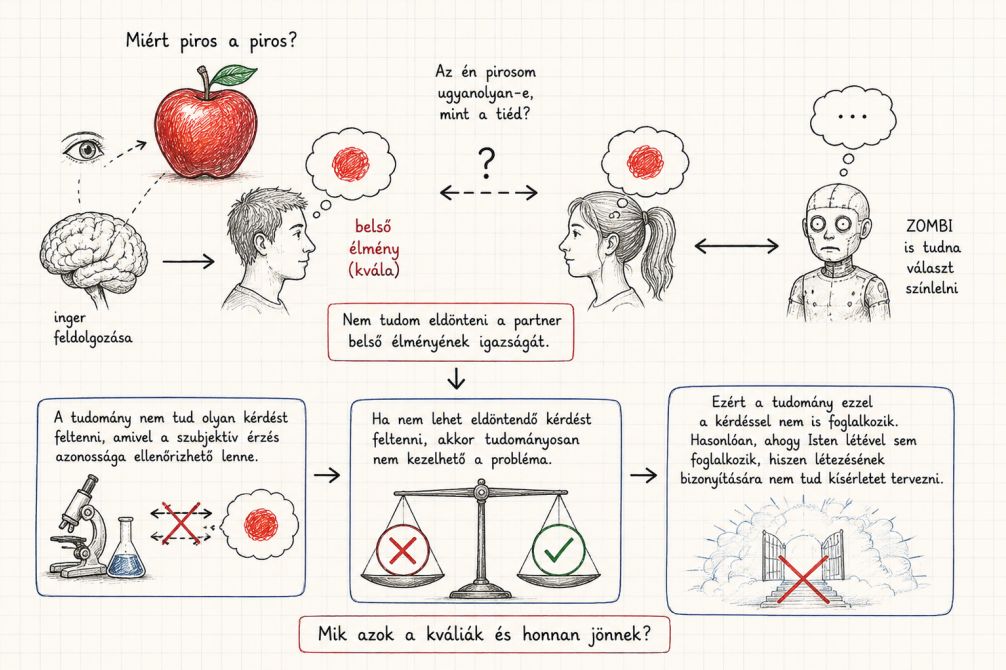


Honnan jönnek a kváliák, az elménkben átélt tulajdonságok.

A filozófusok ezen belső érzések élményét „kváliáknak” nevezik. Ilye a piros pirosa, az orgona illata, a fájdalom hasogatása. Az evolúciós megközelítés jól meg tudja indokolni, hogy miért érdemes egy agynak egy integrált, tudatosságot alkotó rendszert kialakítania. Ez biztosítja, hogy számos szempontot figyelembe véve hatékonyan döntsön. Még azt is meg tudja magyarázni miért kell ennek egy belső élményt kiváltania. Nyilván így jobban integrálódik a rendszerbe az aktuális helyzet. De a nehéz kérdést –Hogyan alakulnak ki a kváliák? Miért piros a piros? Az én pirosom ugyanolyan-e, mint a tiéd?– nem tudja megmagyarázni. Amikor valakivel beszélgetek csak sejtem, hogy nem egy belső érzés nélküli zombi, hanem hozzám hasonló érző ember. De erre nincsen bizonyítékom. Bármely kérdésre, melyet egy belső élményről teszek fel, egy Zombi is tudna választ színlelni. Azaz nem tudom eldönteni a partner belső élményének igazságát. Ugyanígy van ezzel a tudomány is. Nem tud olyan kérdést feltenni, amivel a szubjektív érzés azonossága ellenőrizhető.

Ha pedig nem lehet eldöntendő kérdést feltenni, akkor tudományosan nem kezelhető a probléma. Ezért a tudomány ezzel a kérdéssel nem is foglalkozik. Hasonlóan, ahogy Isten létével sem foglalkozik, hiszen létezésének bizonyítására nem tud kísérletet tervezni. Annyit tud mondani, hogy jelen ismereteink szerint Isten léte nagyon-nagyon valószínűtlen. Ugyanezt tudom én is mondani arra, hogy nagyon-nagyon valószínű, hogy beszélgető

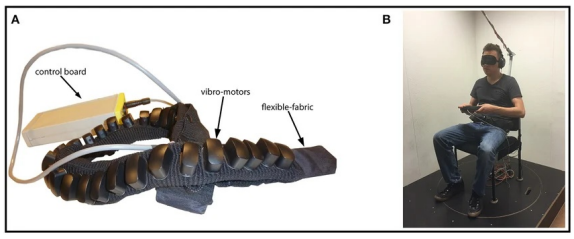
partnerem nem Zombi, hanem egy belső élménnyel rendelkező tudatos lény, hiszen nagyon hasonlít hozzám és nekem van tapasztalatom a saját élményeimről.



A kváliák egyes emberek számára megmutatkozó tulajdonságaival kapcsolatban nem tudunk kísérleteket tervezni, ezért a tudomány nem foglalkozik ezzel a problémával.

Sokan arra a kérdésre, hogyan alakulnak ki a kváliák –a belső élmény– azt válaszolják, hogy ez is egy emergens jelenség. Ha kellően bonyolultak a hálózatok és metahálózatok, a bennük kialakuló mintázatok létrehozzák a kváliákkal rendelkező belső élményt. Arra, hogy ezek nem természeti „állandók", hanem agyunk mintázataiból fakadó egyedi élmények van néhány kísérletes érv. Az érzéki tapasztalatok természetéről szóló vitákban a kváliákat gyakran úgy kezelik, mintha azok a fizikai világ „adott" tulajdonságai lennének: mintha a vörösség, a hangmagasság vagy az érintés minősége közvetlenül a külvilág sajátosságaiból következne.

A szenzoros szubsztitúció (helyettesítés) és augmentáció (kiterjesztés) kísérletei azonban erős érvet szolgáltatnak az ellenkező álláspont mellett. Ezek a vizsgálatok azt mutatják, hogy a belső érzések nem a receptorok fizikai természetéből fakadnak, hanem abból, ahogyan az agy hálózatai az információt feldolgozzák és integrálják. Jó példa erre az úgynevezett mágneses iránytű-öv, amely egy digitális iránytű jelét a derék megfelelő pontjának rezgéses ingerlésére fordítja le. A készülék mindig azon az oldalon rezeg, amelyik az északi irány felé esik. A felhasználók kezdetben pusztán rezgést éreznek a bőrükön. Néhány hét folyamatos viselés után azonban a beszámolók szerint az élmény minősége átalakul: a rezgés háttérbe szorul, és helyette egy állandó „térbeli irányérzet" jelenik meg. A jelet, nem mint bőringert élik meg, hanem mint a földmágnesestér közvetlen érzetét, érzik merre van észak. Ez arra utal, hogy az agy képes egy új információcsatornát olyan módon integrálni, hogy az új, sajátos fenomenológiai minőséget,



A földmágnesesség irányát a viselőjének rezgések útján jelző öv (bal). A jobb oldalon a kalibrálás közben egy forgó platformon elhelyezkedő kísérleti alany látható. Az övnek az észak felé eső része rezgéseket bocsájt ki.

kváliát hozzon létre. Hasonló jelenséget figyeltek meg az érző információk helyettesítését célzó klasszikus kísérleteiben is. Paul Bach-y-Rita taktilis látásrendszerében egy kamera képe elektromos ingerlés mintázat formájában jelent meg a bőrön. A vak alanyok kezdetben pontszerű bizsergéseket éreztek, később azonban arról számoltak be, hogy tárgyakat „látnak" a térben. Az inger fizikailag továbbra is a bőrön jelent meg, de az élmény minősége vizuálissá vált. Ugyanez a jelenség ismétlődik más rendszerekben is, például amikor kameraképet hangmintázattá alakító eszközök látássérült használói idővel nem hangokat hallanak, hanem térbeli formákat és mozgást érzékelnek.

Ezek a megfigyelések nehezen egyeztethetők össze azzal a feltevéssel, hogy a kváliák közvetlenül az érzékszervek fizikai tulajdonságaiból következnek. Ha ez így lenne, akkor a bőr elektromos ingerlése mindig érintés élmény maradna, a hang pedig mindig hallás minőséget hordozna. A kísérletek azonban azt mutatják, hogy az élmény minősége attól függ, hogy az adott információ milyen módon épül be az agy érzékelő és elemző hálózataiba. Amikor az új jel stabil kapcsolatba kerül a térbeli reprezentációkkal, a mozgásszabályozással és a prediktív feldolgozással, akkor új érzeti minőség jelenhet meg. Ez az értelmezés jól illeszkedik ahhoz a felfogáshoz, amely szerint a kváliák emergens tulajdonságok. Ebben a nézetben az érzet élmény nem egyetlen neuron vagy receptor működéséből fakad, hanem a nagyléptékű idegi hálózatok dinamikus mintázataiból. A különböző agyi rendszerek — például a parietális (falilebenyi) térképző hálózatok, a szenzomotoros hurkok és a prediktív integrációs mechanizmusok — kölcsönhatása hozza létre azt a magasabb kérgi területeken kialakuló aktivitási mintázatot, amelyet a tudatos élmény minőségeként élünk meg.



Az érzék kiterjesztés kísérletek ezért különösen fontosak a kváliák természetéről szóló vitában. Azt mutatják, hogy az érzetélmények, kváliák készlete nem rögzített, hanem az idegrendszer szerveződésének és tanulási folyamatai¬nak függvénye. Ha egy új információforrás stabilan integrálódik az érzékelő hálózatok működésébe, akkor új érzeti minőség jelenhet meg. Ez erős kjsérleti támaszt nyújt annak az elképzelésnek, hogy a kváliák nem a természet elemi tulajdonságai, hanem az agy összetett hálózati működésének emergens következményei. Erősen utal ez arra is, hogy mivel agyunk fejlődése során egyedileg tanuljuk meg reprezentálni, leképezni a világot, a leképzéseink és ezért kváliáink is egyediek. Neked is van pirosod, nekem is van pirosom, de azt valószínűleg teljesen máshogy éljük meg. A konszenzus a pirosban pedig a nyelvi, társadalmi interakciók eredménye. Bár ugye a színvakok vagy színtévesztők nehezen veszik át ezeket a konvenciókat, hiszen nincsenek hozzájuk fogódzóik. Sőt még az egészséges színlátású emberek között sincs egyezés a finom színárnyalatok elkülönítésének képességében.

A téma lezárásához tartozik még egy kérdés: Hogy akkor a bonyolult belső reprezentációval rendelkező mesterséges rendszereknek (számítógép, nagy nyelvi modellek) is kell legyen belső élménye? Ez ugyanúgy, mint az ember esetében, a hasonló kísérleti problémák miatt nem megválaszolható. Az AI és a tudat viszonyát később még tárgyalom, legyen itt annyi előrevetve, hogy egyelőre, nem tartom valószínűnek. Ugyanis az emberi elme esetében nagyon fontos, hogy egy hosszú természetbe és társadalomba ágyazott evolúció formálta. Mindig fontosak voltak azok az ingerek, amelyek alapvetően meghatározták túlélésünket. Egy nyelvi modellnek még nincs ilyen megszorítása. Ha mesterséges rendszereink minden szempontból hasonlóak lesznek a mi agyunk felépítéséhez nem látok érvet az ellen, hogy ez



Ezt gondolja az AI az alanti paragrafusról. Kreatívnak valamilyen szinten már mondható, de nem tudjuk lakik-e bent valaki.

bekövetkezzen. Nem lehetünk karbon sovinisztáknak, szilíciumból épült ugyanolyan szerkezetű és hasonló elvárásoknak megfelelő hálózatok, szerintem ugyanazt nyújtják majd. Mindettől függetlenül, nyugodtan mondhatjuk már most is intelligensnek őket. Az intelligencia nem feltételezi a tudatot és a tudatos lények sem feltétlenül nagyon intelligensek (bár azért egyszerű elmék már valamennyire intelligensek kell legyenek).

Szerző: **Gulyás Attila**