

**A biológiai intelligencia.
Az emberi agy evolúciója**

Emberi agy mérete kapacitása:

100 billió neuron

100,000 km nyúlványrendszer

1.25×10^{12} bájt tároló kapacitás

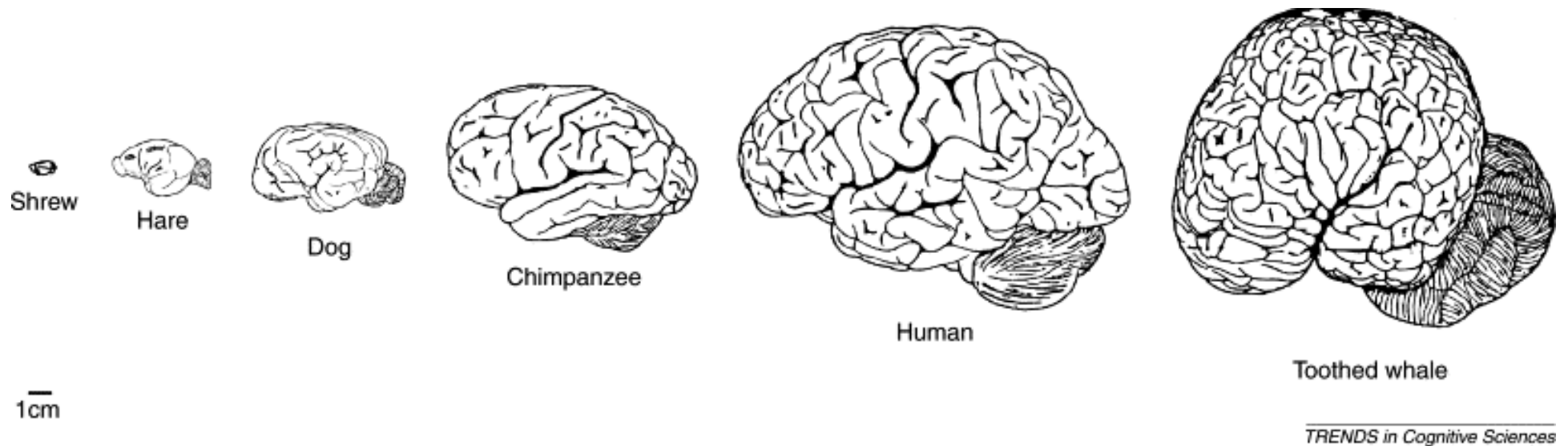
Ezek az impresszív számok vezettek ahhoz a feltételezéshez, hogy az emberi agy kognitív kapacitásai végtelenek.

Viszont az emberi agy az evolúció során olyan struktúrákra épülve fejlődött, amelyek korlátozzák méretét, a tárolt és feldolgozott információ mennyiségét.

Az agyi evolúció hajtóereje

- Túléléshez az élőlénynek a környezeti hatásokra gyorsan és megfelelően kell válaszolnia, ehhez előnyös, ha környezetéről minél több információt gyűjt be, és ezeket képes gyorsan feldolgozni válaszához.
- A megfelelő válasz kidolgozásának limitje az, hogy hogyan képes az élőlény minimális idő alatt minél több szenzoros információt feldolgozni, többféle szenzoros ingert integrálni, és az új információt minél több régivel összehasonlítani.

- A több információ begyűjtéséhez, több emléknym tárolásához az agy megfelelő területeinek növekedése szükséges, a gyors feldolgozáshoz pedig rövid ingervezetési idő, rövid axonhosszúság kell.



Cickány

Fogascet



Biológiai intelligencia:

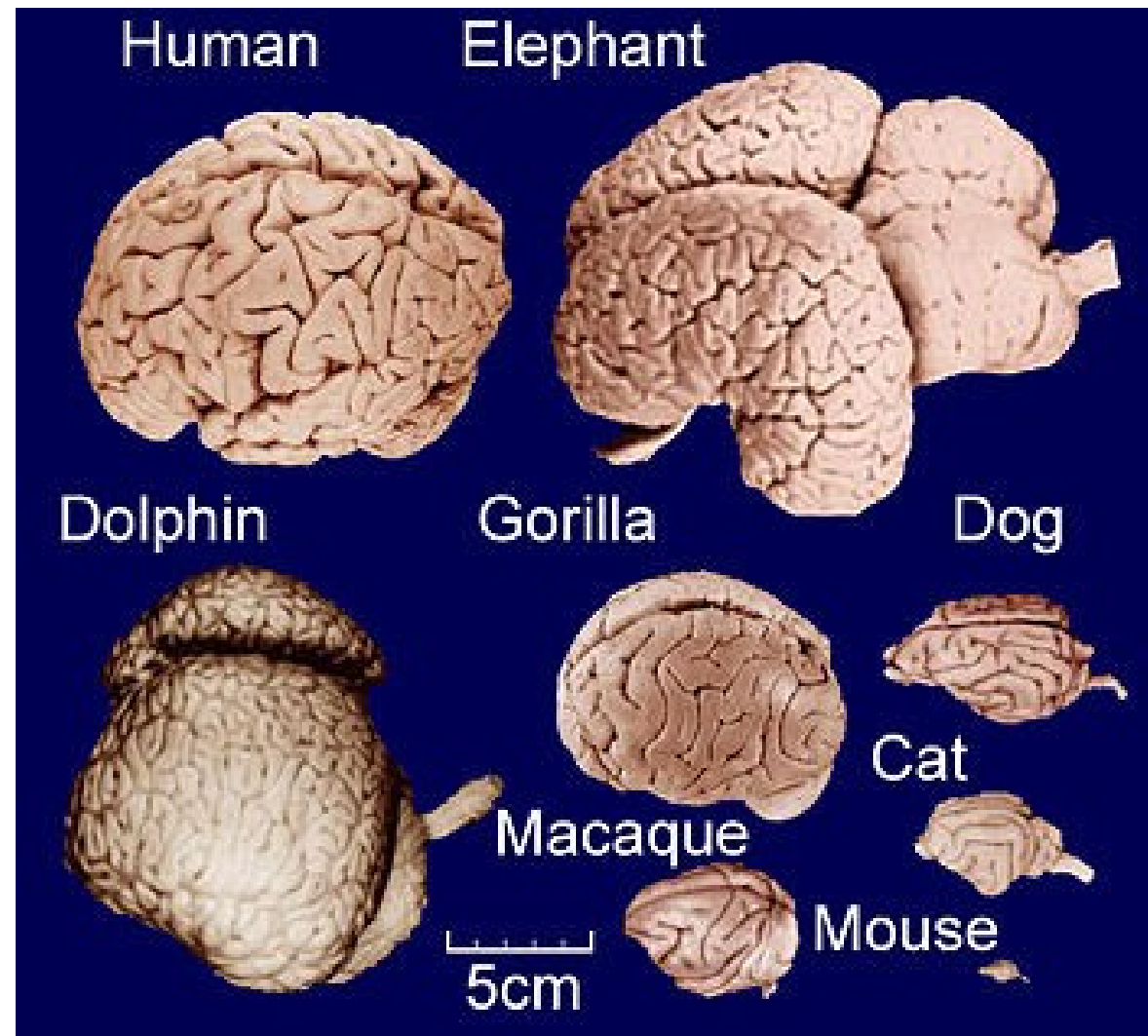
Intelligencia az emberek gondolkodási, alkalmazkodási, tanulási képességeivel függ össze.

Biológiai intelligenciában a környezethez való alkalmazkodási képesség nyilvánul meg.

A szenzoros információ komplex feldolgozását, illetve a tervezést, végrehajtást és értékelést végző struktúrák terméke,

az egyes fajok intelligenciája tükröződik a fajok idegi struktúrájában, leginkább az agykérgi neuronális körök komplexitásában.

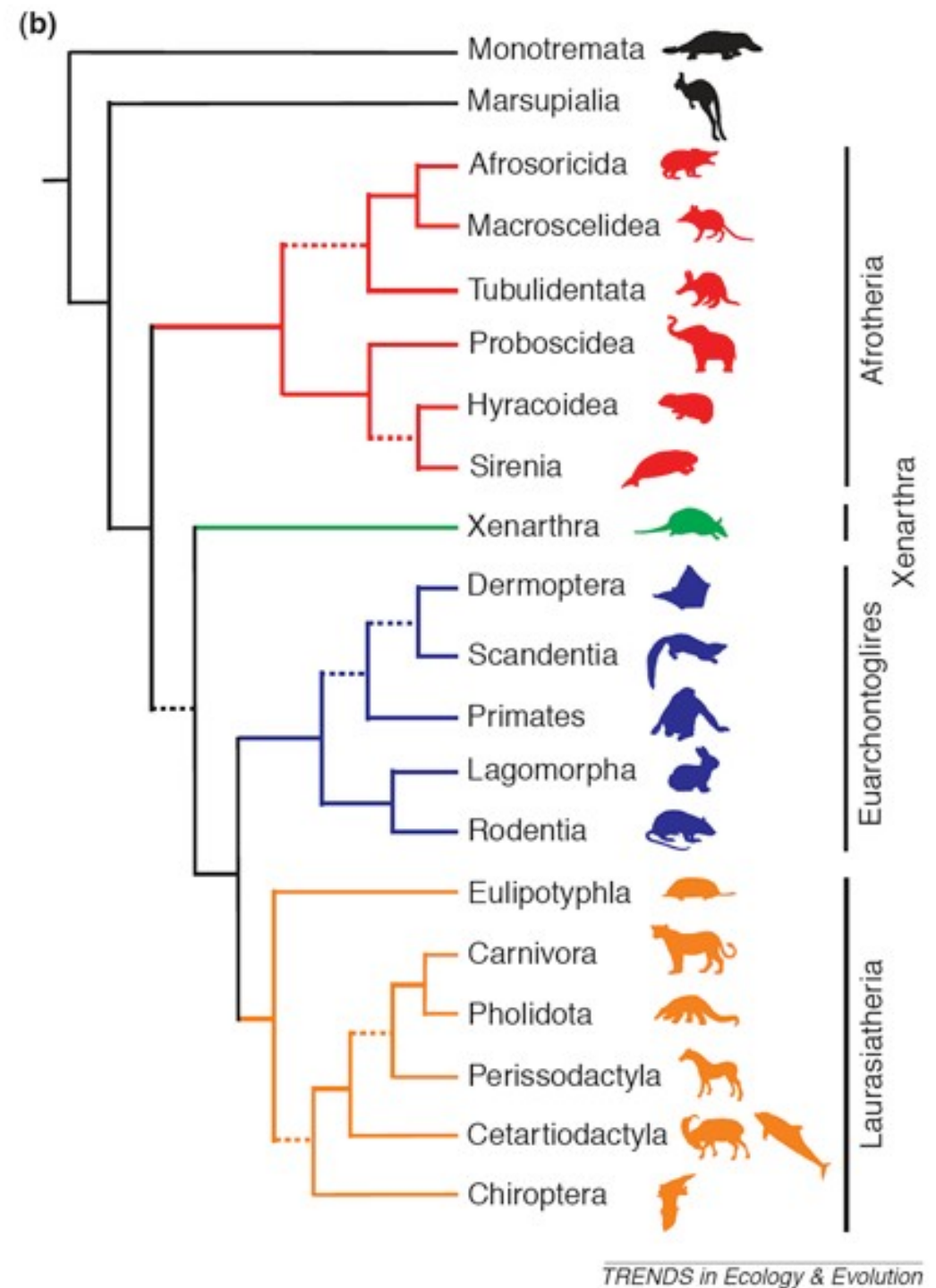
Biológiai intelligencia egymástól függetlenül több vonalon is kialakult az emlős evolúció során. Főemlősök, elefántok és cetfélék tartoznak a legintelligensebb fajok közé. A főemlősök között az emberszabásúak intelligensebbek mint a nem emberszabású majmok és az ember intelligensebb mint a többi emberszabású.



Genetikai eredményeket figyelembe vevő emlős evolúciós fán látszik, hogy a négy öregrendből 3-ban valószínűleg egymástól függetlenül magas szintű biológiai intelligencia fejlődött ki (ceték, emberek és elefántok).

A Vendégizületeseknél (lajhások, hangyászok stb) nem.

Madaraknál szintén kimutatható az intelligencia.



Intelligencia mérése: Spearman-féle g faktor:

Spearman azt a galtoni tételt akarta igazolni, hogy nincsenek különálló nyelvi, matematikai, tér-
vizuális stb. képességek, hanem egyetlen általános intelligencia felelős mindenfajta területen nyújtott
teljesítményért. Valaki vagy mindenben okos, vagy pedig mindenben buta. Spearman a mentális
tesztek faktoranalízisének nyomán valóban azt találta, hogy aki az egyik teszten jobb eredményt ér
el, az a többin is, és fordítva, ezért létezik egyetlen általános faktor, amely megmagyarázza a teljes
változatosságot. Ezt a faktort Spearman g-faktornak nevezte el.

Rágcsálók: tanulási és térbeli navigációs tesztek. Eredmény nem
egyszerűen félelemtől, stressztől, szenzoros és motoros képességektől függ.
Patkányokban összefüggött az agy méretével és öröklődött.

Gerinces agy általános jellemzői

Ontogenezis során a velőcső feji végén három tágulat, 3 agyhólyag jelenik meg rajta: származékai minden gerincesben ugyanazok.

Előagy (*prosencephalon*):

köztiagy, (*diencephalon*)

két előagyi félteke (*telencephalon*)

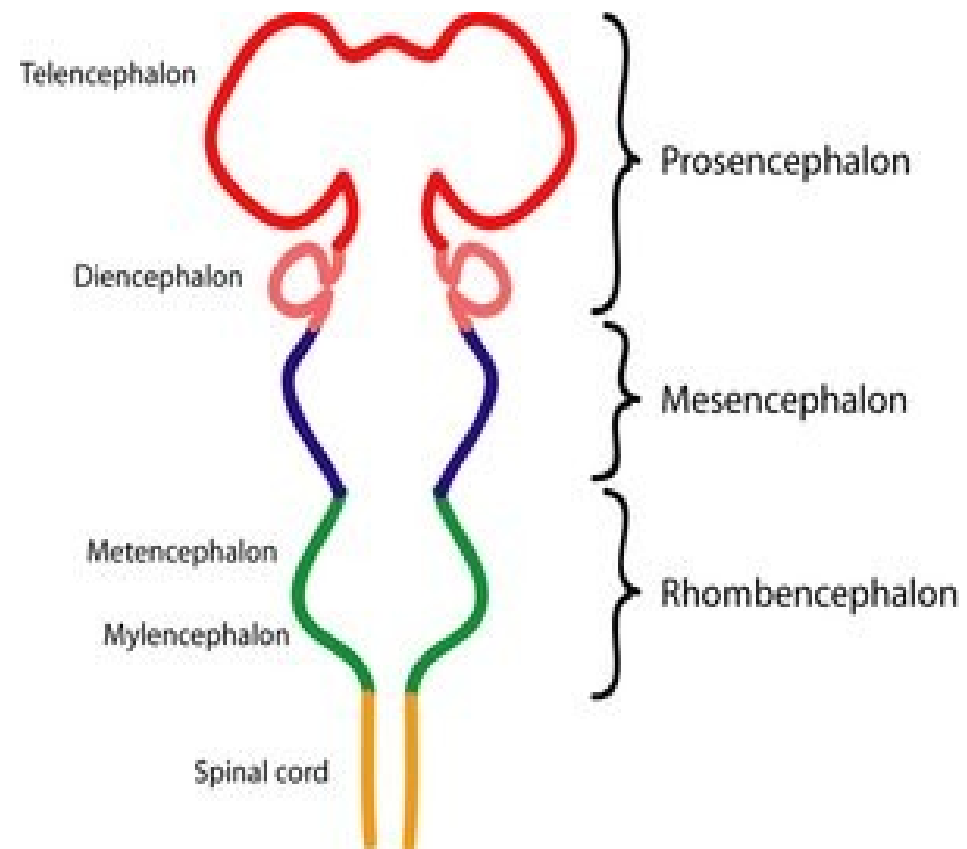
Középagy (*mesencephalon*)

Utóagy (*rhombencephalon*):

nyúltvelő (*medulla oblongata*)

hid (*pons*) magzatburkosoknál

kisagy (*cerebellum*).



Neocortex kialakulása

Előagy (telencephalon) szürkeállománya többféle struktúra között oszlik meg:

Törzsdúcok: Subpallium

Törzsdúcok: nem akaratlagos mozgások koordinálása kisaggyal együttműködve indulattal (agresszió, félelem támadás, védekezés) illetve szexuális viselkedéssel kapcsolatos mozgások: limbikus rendszerrel együttműködve.

Pallium:

archicortex: hippokampális formáció: szaglás és memória (helymemória)

paleocortex: szaglóközpontok és amygdala

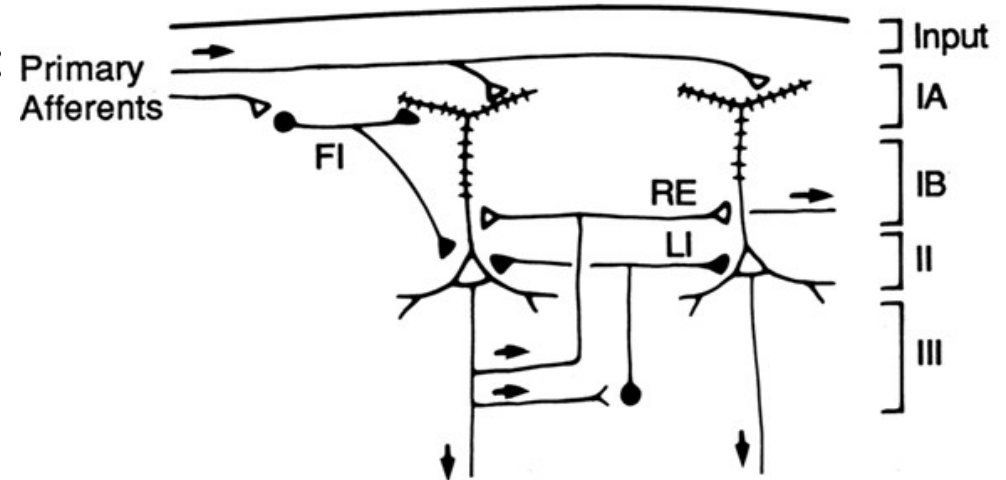
neocortex: a talamusz közvetítésével érzékszervi információ primer területekbe onnan információ másodlagos harmadlagos stb területekre kerül át.

Neocortikális rétegek kialakulása:

A) 3 rétegű kéreg kapcsolatrendszere.
 primer afferensek piramis sejtek apikális dendritjén végződnek. Lokális inter-neuronok feed forward (FI) és laterális (LI) gátlást, a piramis sejtek kapcsolatai recurrens serkentést (RE) biztosítanak.

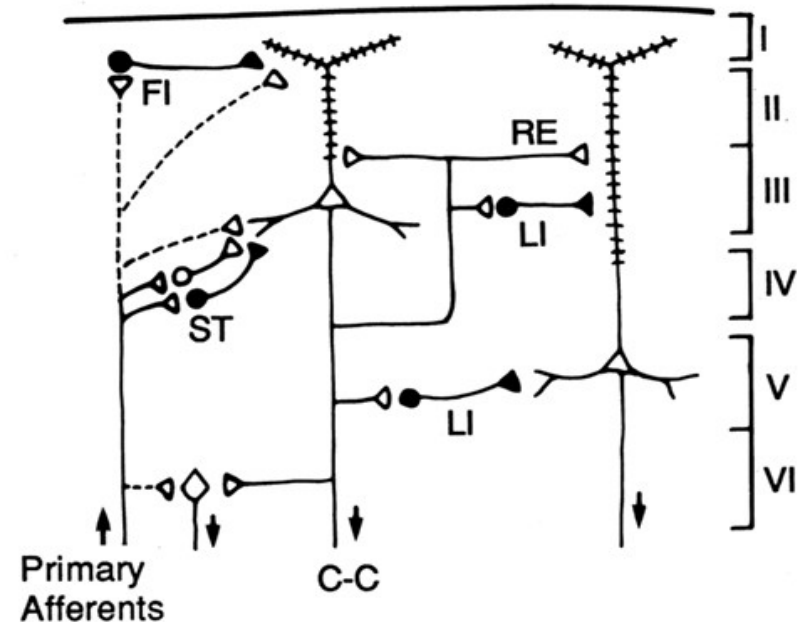
B) 6 rétegű neocortex kapcsolatrendszere
 Kortikocortikális rostok (C-C) kötik össze a különböző kéregrészeket. Afferensek a mélyebb rétegek felől érkeznek. Csillagsejtek (ST) külön réteget alkotva fogadják az afferenseket. A 3 rétegű kéregre jellemző talamikus afferenseket szaggatott vonal mutatja. Piramis sejtek két rétegben helyezkednek el, mindkét réteg rendelkezik LI és RE kapcsolatokkal.

A OLFACTORY-HIPPOCAMPAL-GENERAL CORTEX



NEOCORTEX

B



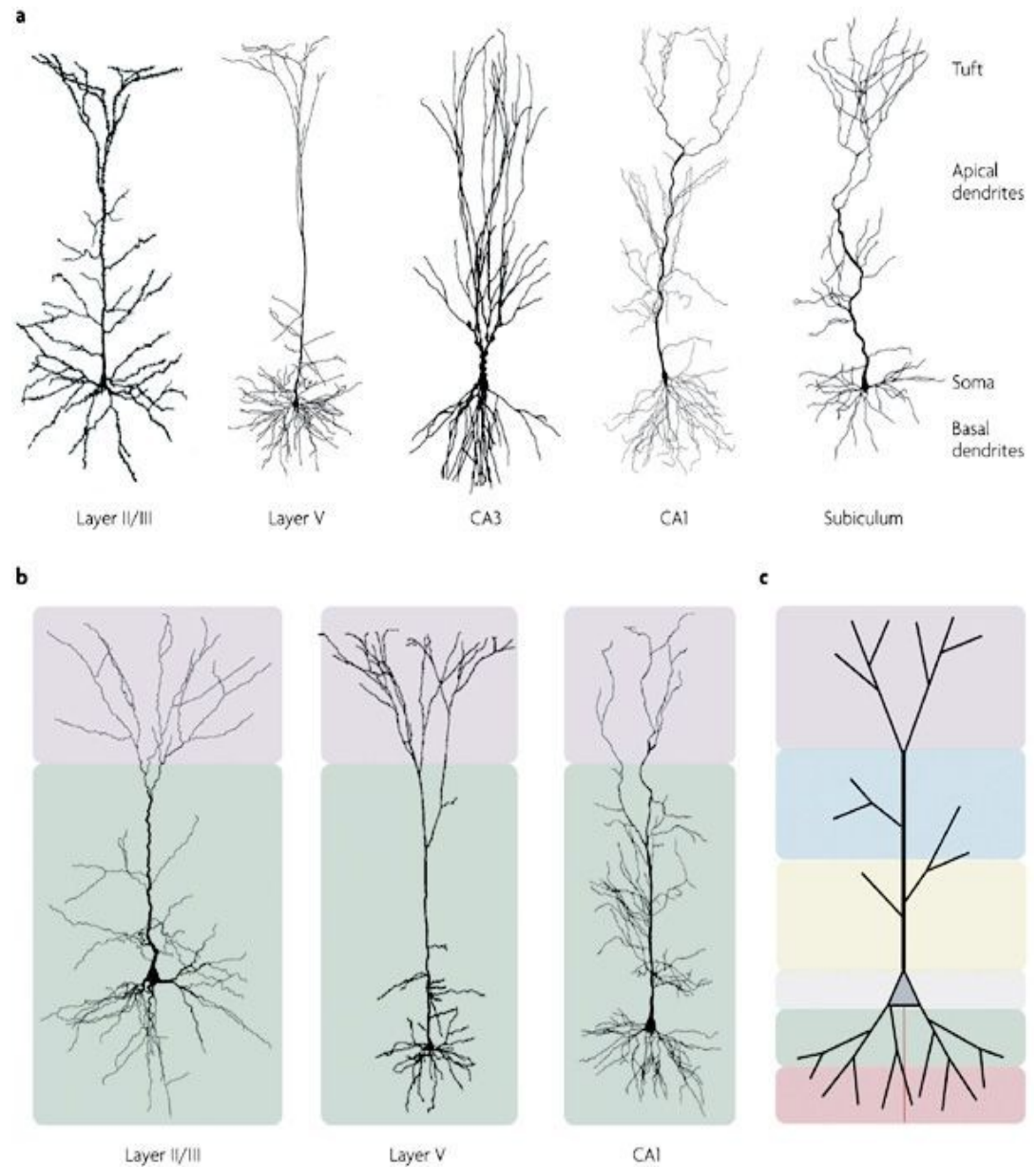
Főbb hasonlóságok a 3 és 6. rétegű kéreg között

Fő sejttípus a piramissejtek amelyek apikális és bazális dendritfával rendelkeznek.

Serkentő bemenet a dendrittüskékre érkezik.

Piramissejtek rekurrens axon kollaterálisokon keresztül kapcsolódnak egymáshoz.

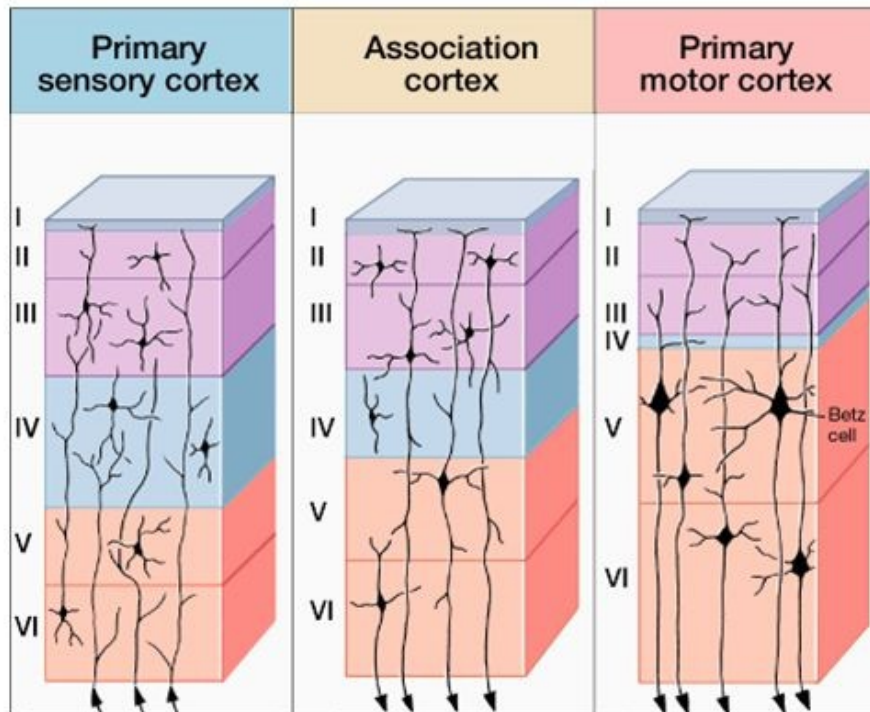
Gátló interneuronok laterális és feed forward gátlást biztosítanak.



Főbb különbségek a 3 és 6 rétegű kéreg között:

- A 3 rétegű kéregben az afferensek felülről érkeznek az efferensek a III rétegből indulnak. A neocortexben az afferensek és az efferensek is áthaladnak a legtöbb rétegen. Mindegyik réteg kimenet potenciális forrása lesz.
- A neocortexben megjelennek a csillagsentek amelyek az afferenseket fogadják és eljuttatják a piramissejtekre.
- A 3 rétegű kéregben a gátló interneuronok a középső kéreg piramissejtjei köré szerveződnek a neocortexben a felszíni és mély rétegek köré egymással kapcsolódó külön rendszer szerveződik.
- A rétegeken végigmenő afferens és efferens rostok, a két réteg piramissejt köré szerveződő gátló interneuronok és a csillagsejtek kapcsolatai miatt a potenciálisan kialakítható kapcsolat típusok száma a neocortexben nagyon megnő.

Rétegek



- L I.: MOLEKULÁRIS RÉTEG
- L II.: KÜLSŐ GRANULÁRIS SEJTEK RÉTEGE
- L III.: KÜLSŐ PIRAMIS SEJTEK RÉTEGE
- L IV.: BELSŐ GRANULÁRIS SEJTEK RÉTEGE
- L V.: BELSŐ PIRAMIDÁLIS SEJTEK RÉTEGE
- L VI.: POLYMORPHIC v. MULTIFORM RÉTEG

Agy jellemzői ami intelligenciával összefüggnek:

- agytömeg és testtömeg aránya,
- cortex és szubkortikális struktúrák aránya
- prefrontális cortex relatív mérete.
- Legjobb korrelációt a kortikális neuronok száma és az ingerületvezetés sebessége mutat az intelligenciával.

A kortikális neuronok száma csak kicsit több emberben mint az elefántokban vagy bálnákban, de az emberi kortikális piramissejtek kapcsolatrendszere komplexebb, mint ezeké az élőlényeké.

Az agyi evolúció: agykéreg arányának növekedése:

Emlősöknél szembetűnő evolúciós trend a nagyagykéreg erőteljes növekedése:

a főemlősöknél és a tengeri emlősöknél az agy nagy részét alkotja, rovarrevőknél az agykérgi szürkeállomány a teljes agyi térfogat 25%-át adja addig az embernél 50%-át.

Ha a fehérállományt is hozzávesszük akkor embernél 80%-ot egéرنél pedig csak 40%-ot tesz ki.

Kisagynál nincs ilyen növekedés: stabilan 10-15%-a a teljes agytömegnek.

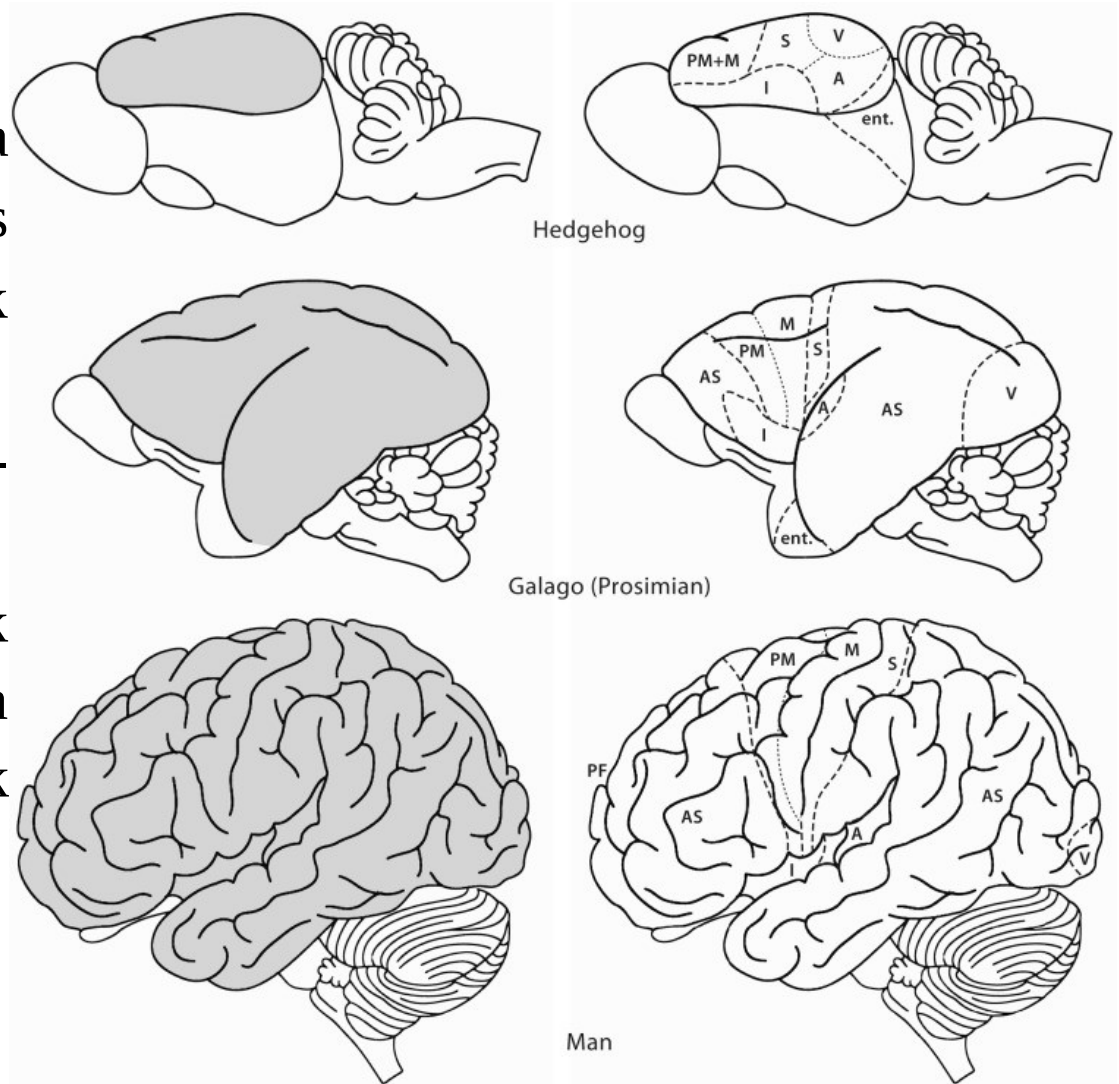
Különböző emlősök agyának oldalnézeti: nagyagy (szürke) aránya egyre nő a többi struktúrához képest.

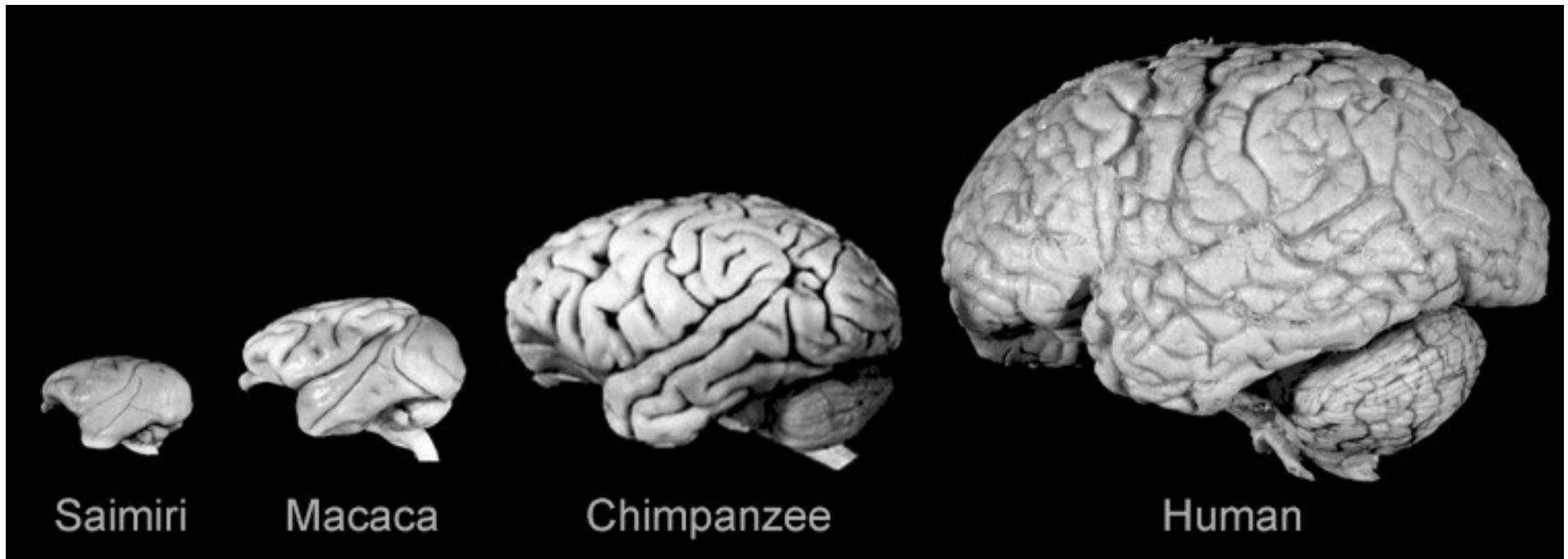
Sündisznóban (hedgehog) a neocortex nagy részén szenzoros (A, S, V, M) és motoros területek vannak.

Galagoban megjelenik az asszociációs (AS) kéreg frontálisan.

Emberben ezeknek a területeknek a mérete tovább nő, barázdálódva

fér már csak el.





A neocortikális neuronok neurogenesisének hossza jobban nő mint a többi agyterületé. Emberszábasú főemlősök agyának laterális képe mutatja a neocortex növekedését. Mókusmajmoknál (Saimiri) még alig barázdált az agyfelszín, embernél barázdák és tekervények bonyolult rendszerét látjuk.



Közönséges mókusmajom

(*Saimiri sciureus*) 22 g;

Homo sapiens: 1350 g

Rhesusmajom

(*Macaca mulatta*) 95 g;

Csimpánz

(*Pan troglodytes*) 420 g;

A barázdált felszín miatt a neocortex mérete emberben 2000 cm^2 több mint 4x akkora mint egérben lenne, ha az arányokat tartva felskáláznánk az egér agyat humán agy méretűre.

A neocortexen belül a szürkeállomány térfogata (főleg dendritekből és velőshüvely nélküli axonokból összetevődő lokális neuronhálózatok) lineárisan nő az agytérfogattal, kb ugyanakkora százalékát adja az agytérfogatnak minden emberszabású főemlősben.



A fehérállomány (velőshüvelyes axonok), vagyis a távolabbi kapcsolatokat alkotó axonok relatív aránya nő.

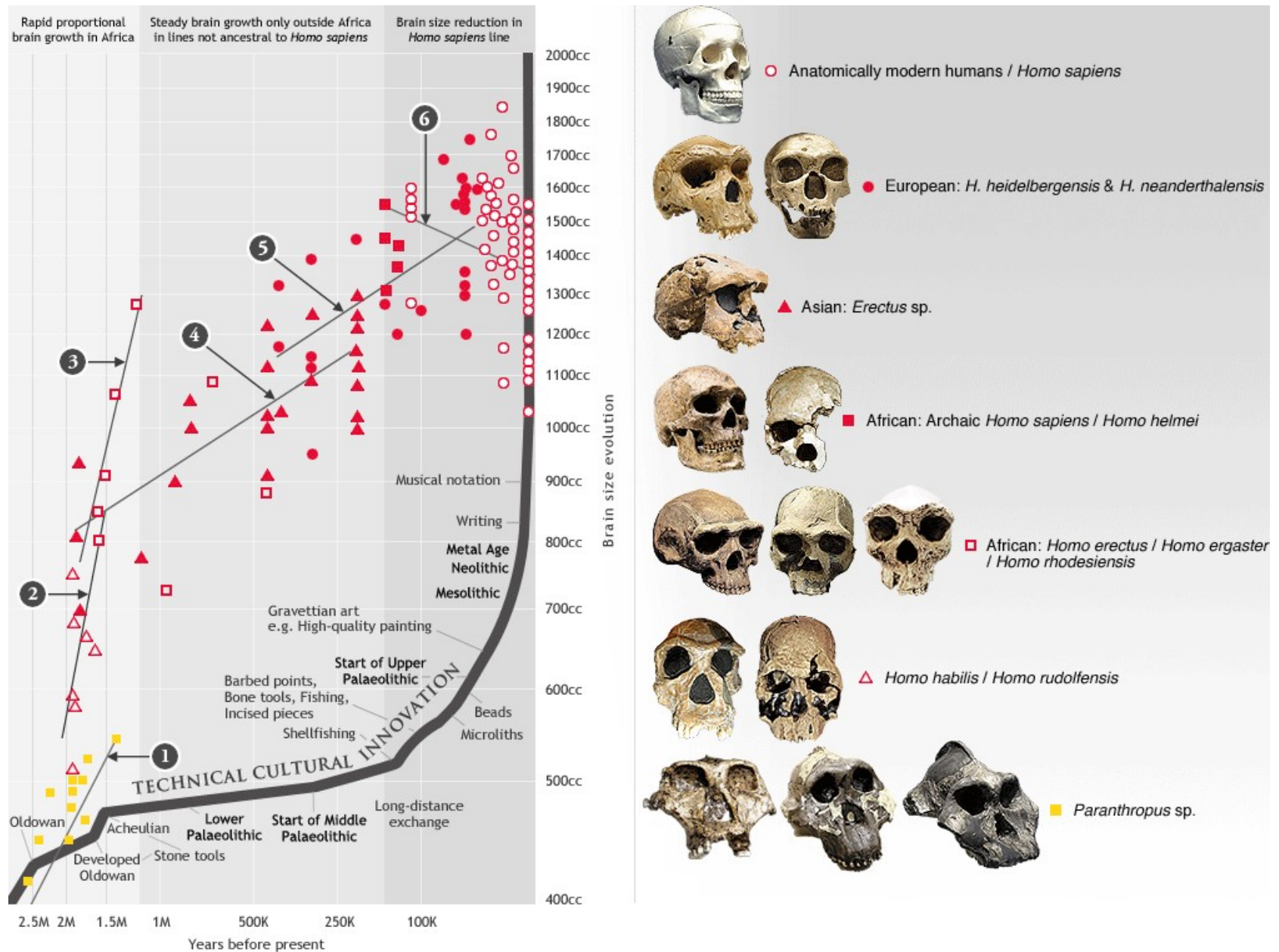
A törpe selyemmajomnál (*Cebuella pygmaea*) 9%, embernél 35%.

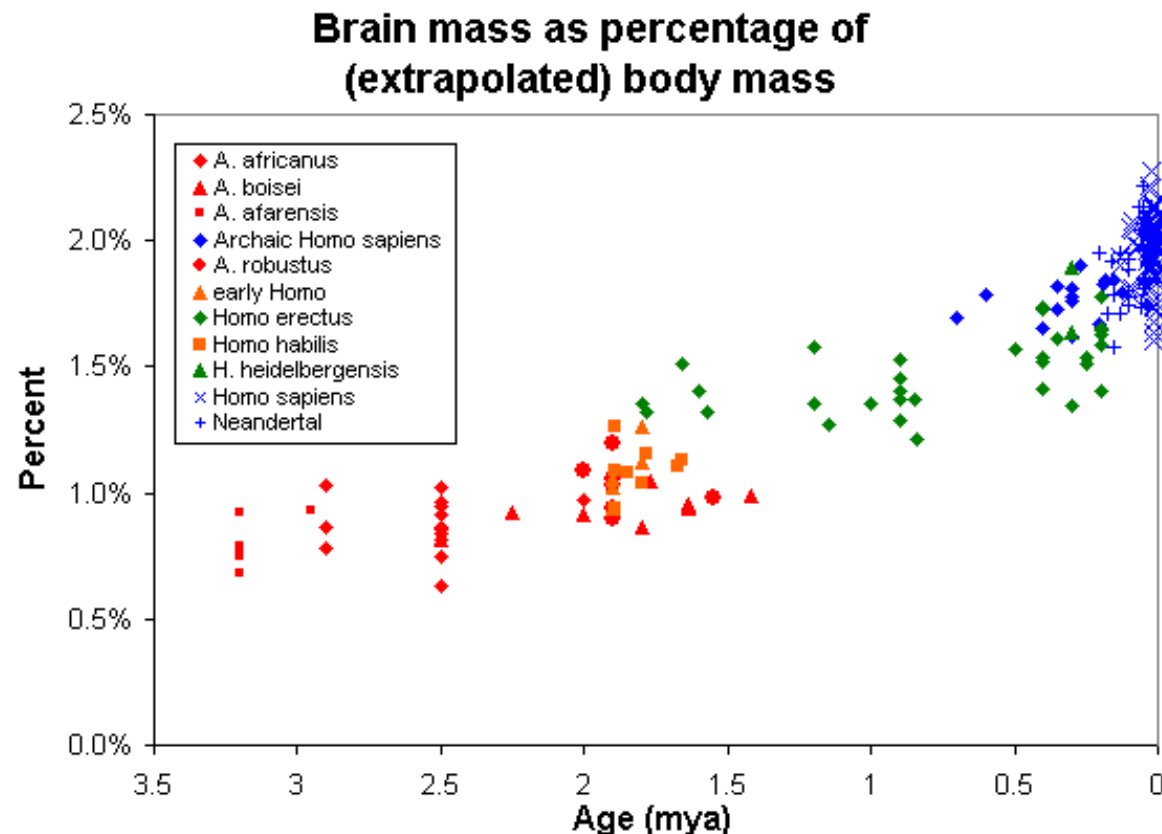
A fehérállomány erőteljes növekedési tendenciát figyelembe véve egy hipotetikus 3000cm³-is agytérfogattal rendelkező főemlősnél a fehérállomány majdnem 50% lenne (1470cm³)

A főemlősöknél a neocortex arányának növekedése a fehérállomány, vagyis a globális összeköttetések arányának növekedését jelenti.

Humán agy jellemzői

Homoidák agymérete





Dataset: All measurements of hominin cranial capacity available in the literature as of September 2000, for skulls older than 10,000 years old. Adult specimens only. Average is presented where multiple measurements were made. N = 214 points. **Brain mass** = **cranial capacity**/1.14 (Kappleman 1996, "The evolution of body mass and relative brain size in fossil hominids." *J. Human Evo.*, 30(3), 243-276). **Body mass** = $10^{((\log CC + 2.73)/3.249)}$ (see EQ worksheet).

Data source: C. De Miguel and M. Henneberg (2001). "Variation in hominid brain size: How much is due to method?" *Homo* 52(1), pp. 3-58. Data copied into Excel from Appendix: "From Lucy to Boskop" (pp. 20-49). **NOTE: Body mass numbers used here are extrapolations based on the changing relationship between the regressions of hominin body mass and cranial capacity vs. time in Figure 1 of Henneberg and de Miguel 2004. This is only intended to give viewers an idea of the change in brain size with body size factored out, not provide maximum statistical rigor.**

Chart by **Nick Matzke** of **NCSE** (www.ncseweb.org). Free to use for nonprofit educational use (with acknowledgement). Version 1.5, October 9, 2006.

Az emberi agy tér-fogata 3,5 millió év alatt megháromszorozódott: az Australopithecusokra jellemző átlagosan 450 cm³-ről a mai ember esetében átlagos 1350 cm³-re nőtt

Az agy energiaigényes rendszer: a teljes anyagcsere 15-20%-át igényli. Az energiában gazdag táplálék így létfontosságú szerepet kapott az egyre növekvő agy evolúciójában

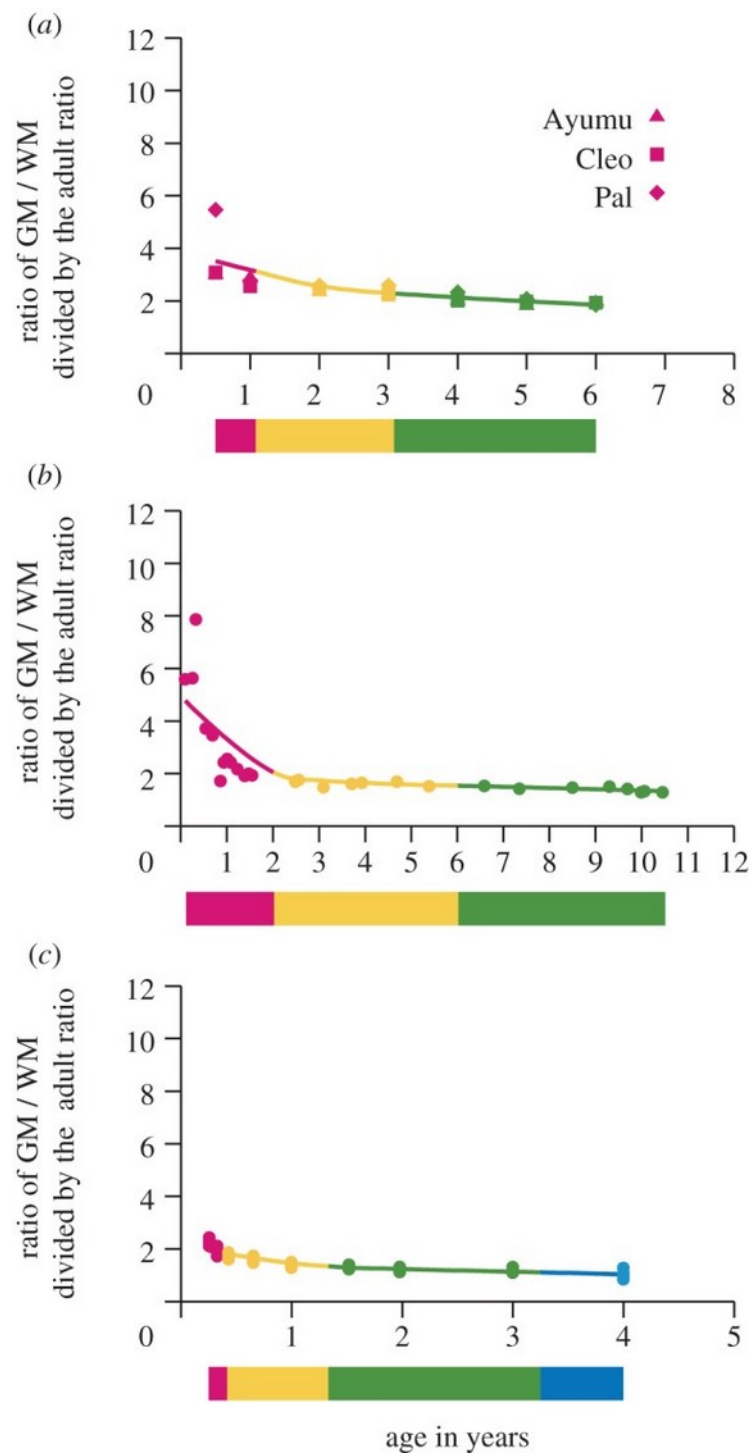
Humán agy ontogenezise

Szürkeállomány (GM) és fehérállomány (WM) arányának változása az egyedfejlődés során a) csimpánzokban, b) emberben, c) rhesusmajomban.

Magenta: csecsmőkor, sárga: kisgyermekkor, zöld: kölyökkor, kék: serdülőkor

Legnagyobb mértékű fehérállomány növekedés embernél.

Az emberi agy mérete már a magzati 16. héten 2x nagyobb mint a csimpánzé. 22. héttől csimpánzagy növekedése lassul, emberi agy növekedése továbbra is gyorsabb, mint a többi szervé.



A beszéd a humán intelligencia ugrásszerű fejlődésének alapja.

Beszéddel kapcsolatos genetikai változások:

FOXP2-gén mai emberre jellemző szerkezetének kialakulása egybeesett a Homo sapiens megjelenésével. Ez a genetikai módosulás tette lehetővé az emberi beszéd kialakulását.

FOX proteinek génexpresszió szabályozásában játszanak szerepet.

A FOXP2-gén (kromoszómalokalizáció: 7q31) a belső szervek és az idegrendszer intrauterin fejlődését, és a szenzomotoros folyamatokat, a motoros tanulási képességet befolyásolja minden gerinces állat esetében.

Az emberi FOXP2-aminosav-szekvencia 3 helyen tér el az egéretől és 2 helyen az emberszabású majmokétól.

Zebrapintyeknél a hímek ugyanazt a „dalt” éneklik az udvarlás időszakában. Fiatal zebrapintyeknél az ének-tanulás időszakában megnövekszik az X régióban a FOXP2 gén expressziója. Amikor a hím egyedül gyakorol, a FOXP2 gén mRNS-mennyisége csökken a striatum X régióban, ha a nősténynek énekel, akkor magasan marad, vagyis a FOXP2

gén az idegrendszer kifejlődése után is működik, motoros működések mellett szociális funkciókkal is kapcsolatba hozható.

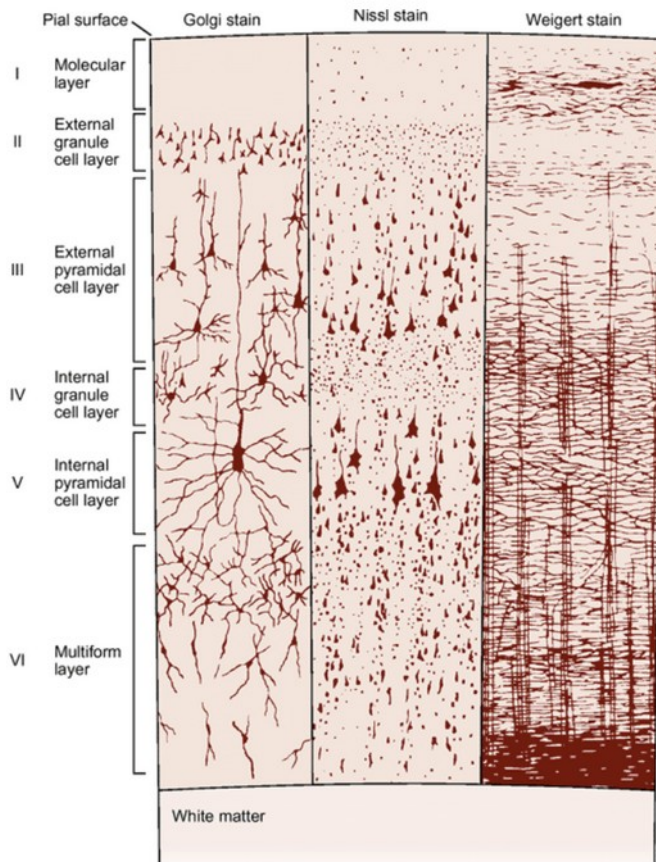
A felnőtt kanárinál azokban a hónapokban észlelhető ugyanez, amikor megváltoztatják a „dalaikat”.

Beszéddel kapcsolatos anatómiai változások:

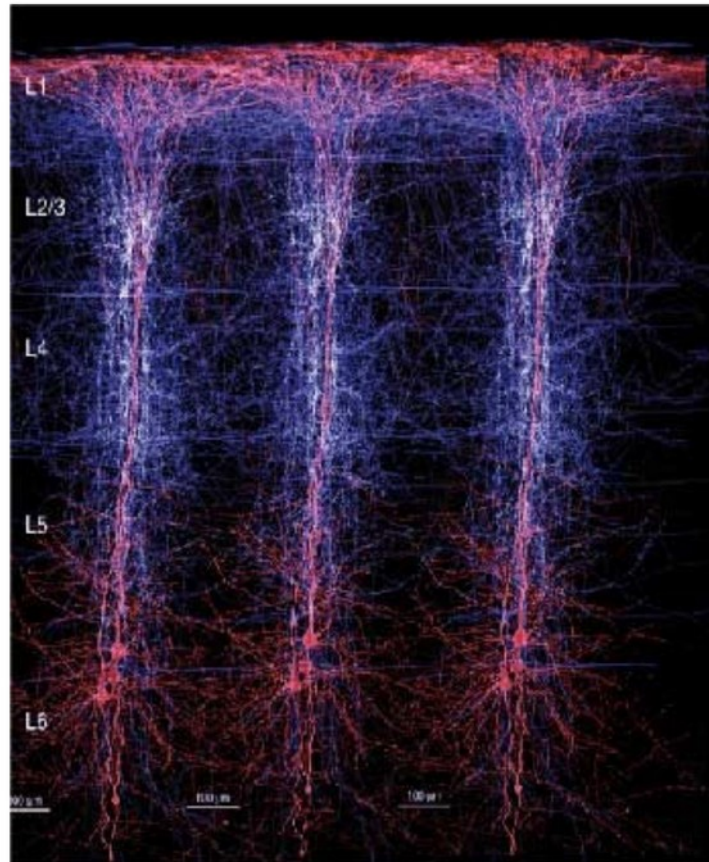
Anatómiai alapja: planum temporale az emberi bal agyfélteke beszédfunkciókért felelős központi régiója sokkal nagyobb. Ez jelenti a legjellegzetesebb humán agyi aszimmetriát, ami jól definiált funkcionális aszimmetriát is jelent.

A kézhasználati preferencia, a lateralizált eszközhasználat révén kialakult agyi aszimmetria a beszéd és az emberi intelligencia kialakulásának előfeltétele

Neocortikális oszlopok: (mini-koloumnák) alapvető szerveződési egység



source: Kandel, Principles of Neural Science



source: lafayette.edu

emlősökben.

Információfeldolgozás magasabb szintjét hordozó egységek, megengedik a környezetről származó információ különböző aspektusainak kombinálását.

Az agy egyre növekvő komplexitását a hason-

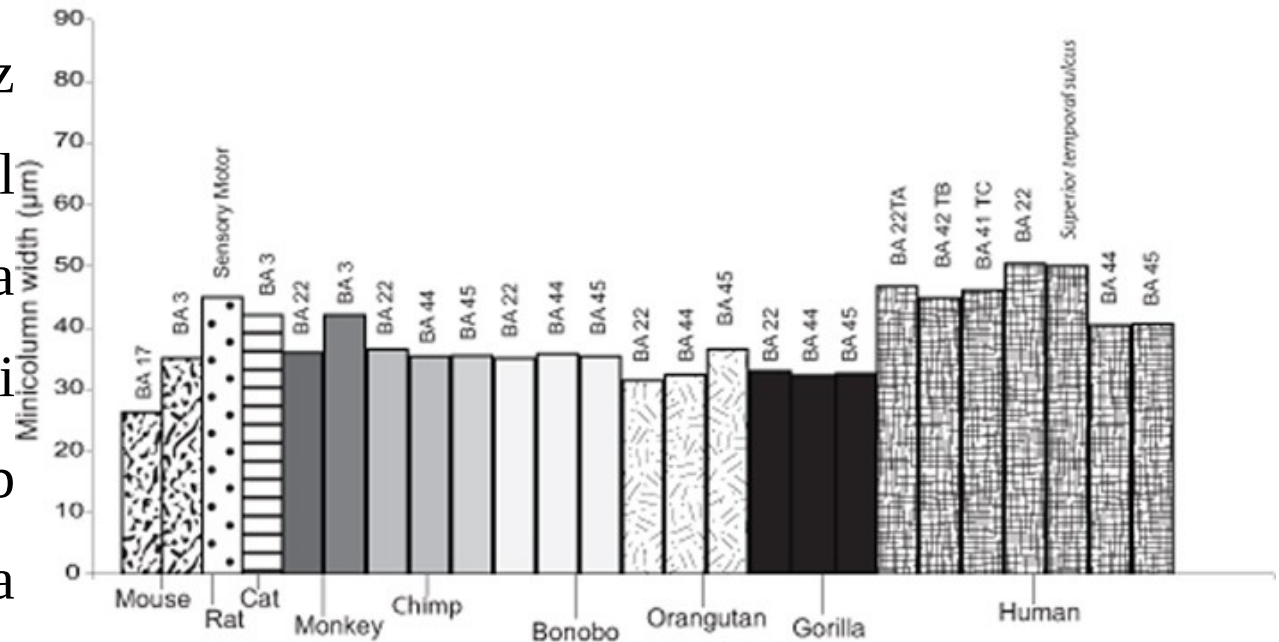
ló szerveződésű egységek hierarchikus szerveződése adja, ebben az elrendezésben az elemek kapcsolatát kisebb mennyiségű axonnal lehet biztosítani.

Pyramidal cell array

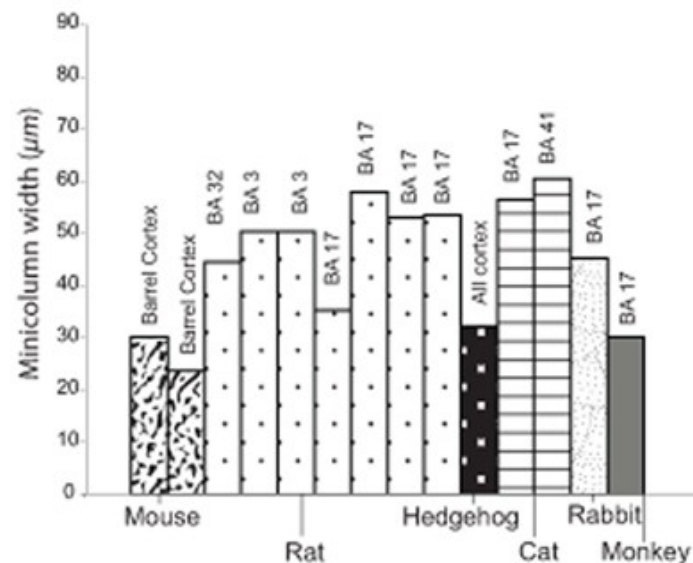
Mini-kolumnák:

Első vizsgálatok ezeknek az oszlopoknak nagyjából hasonló méretére sejt számára csodálkoztak rá. Későbbi átfogóbb, részletesebb vizsgálatok világítottak rá a különbségekre.

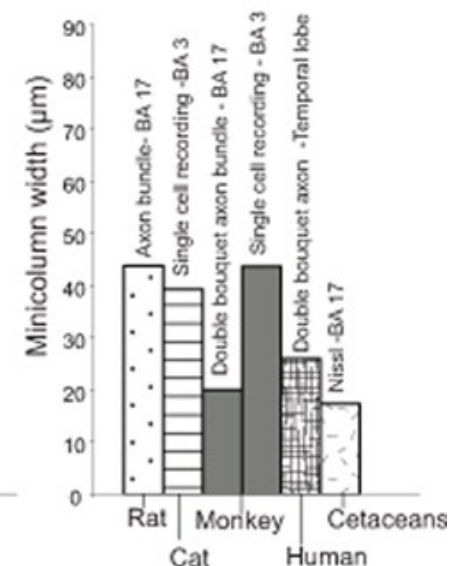
Emberben szélesebb mint a majmokban, alacsonyabb rendűekben lehet széles oszlop de abban kisebb a neuron sűrűség.



Apical dendrite bundle



Other methods



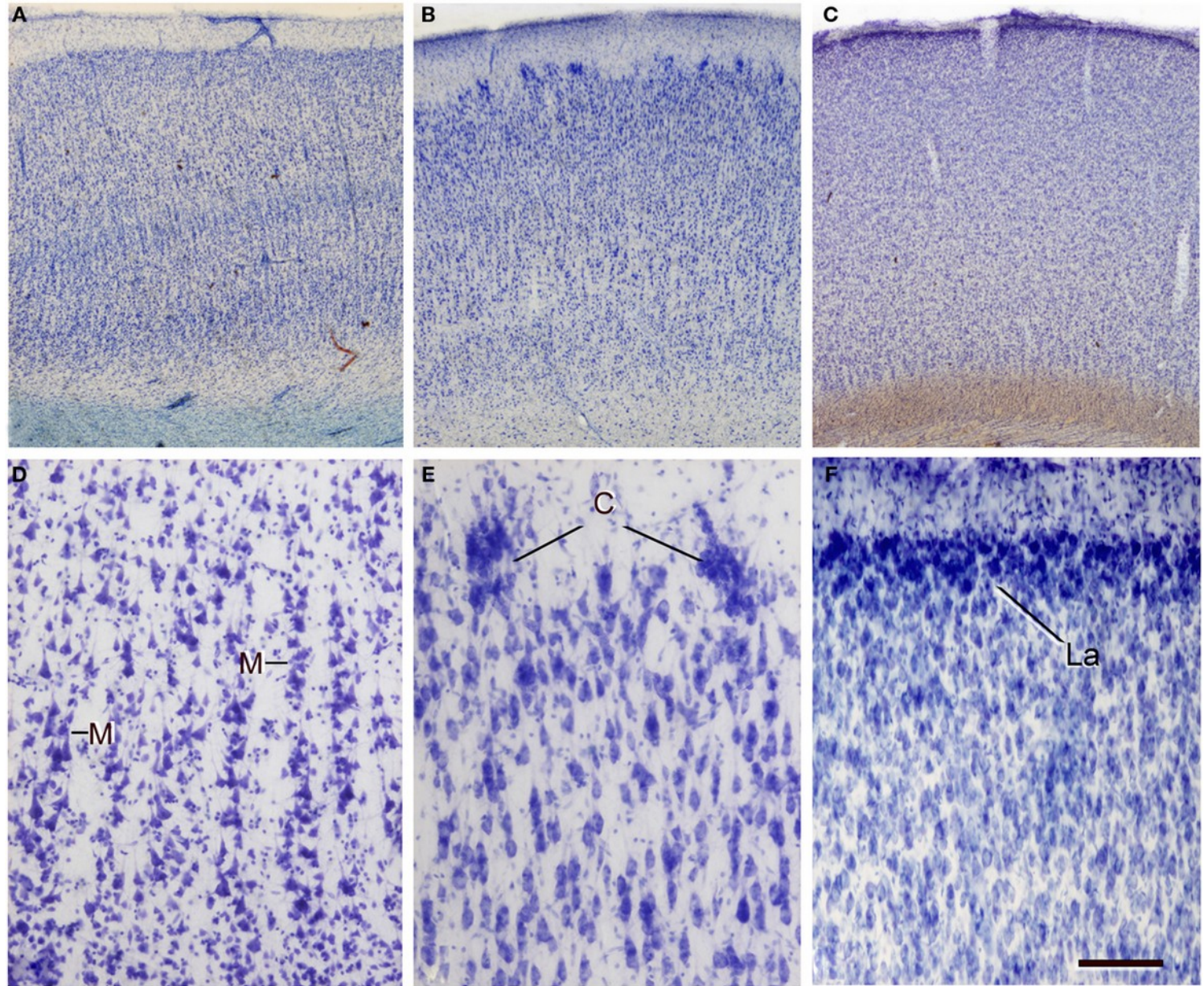
Neuron denzitás:

Tionin festés kis nagyítás:

A) humán Brodmann 21,
B) zsiráf látókéreg,
kacsacsőrű emlős szoma-
toszenzoros kéreg.

Nagy nagyítás: cito-
architektuális különbsé-
gek: embernél oszlopsze-
rű sejtcsoportok (M),
zsiránál neuron csopor-tok
(C), platypusnál sejt-dús
II. réteg (La).

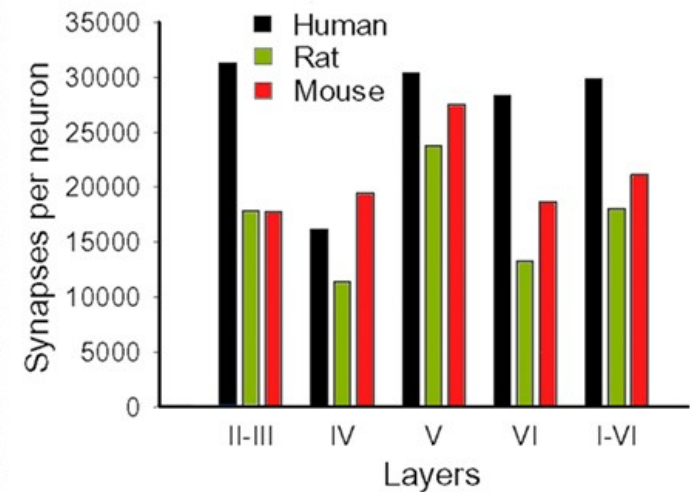
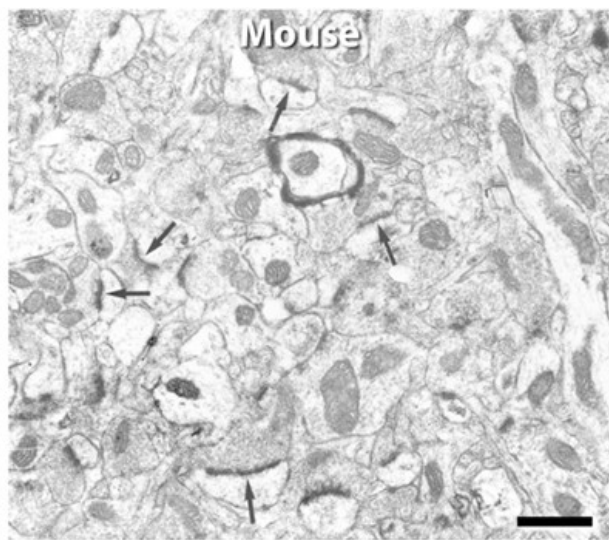
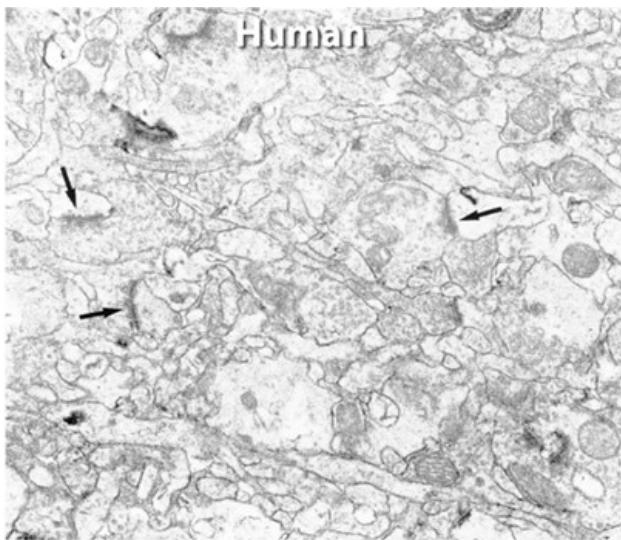
Scale bar: 710 μm in (A–
C); 100 μm in (D–F).



Szinapsziszszám:

Szinapsziszszám neurononkén emberben és egérben: Elektromikroszkópos képen látszik, hogy egér agyban a szinapszisok denzitása nagyobb, mint az emberi agyban. A neuronkénti szinapszis szám viszont emberben nagyobb. A kevesebb inputot fogadó neuronok denritjei rövidebbek, a sejttesthez közel elágaznak, emiatt nagyobb a szinapszis sűrűség kevés szinapszissal rendelkező sejteknél.

Egér – ember vonatkozásban igaz, egér patkány vonatkozásban nem.



Neocortikális oszlopok felépítése:

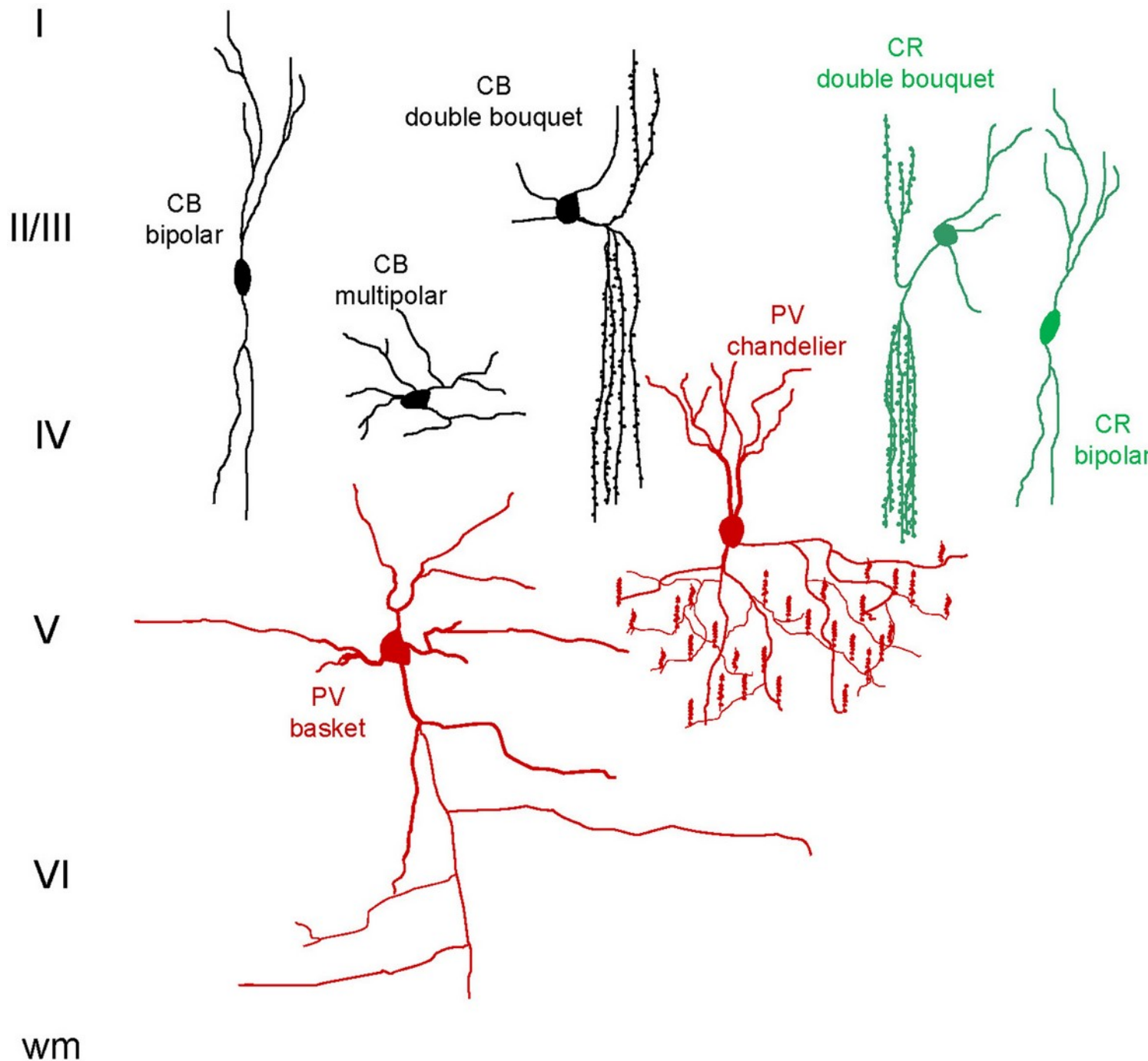
interneuron típusok fajonként eltérnek

emberben különösen a prefrontális kérgi oszlopok szélesebbek mint a csimpánzoké, az ezekhez az oszlopokhoz tartozó nagy mennyiségű neuropil (dendritek és velőshüvely nélküli axonok összessége) miatt.

Csimpázokkal közös őstől elszakadó humán evolúció egyik iránya a neocortikális oszlopok összeköttetéseinek módosítása volt.

Különösen a prefrontális kéregben (tervezés, nyelv, szociális viselkedés, időbeliség követése) szembetűnő a kapcsolati hálózat bővülése.

A kérgi terület növekedésnek kis hányadát adja az oszlopok méretének növekedése, az evolúció során az oszlopok száma is jelentősen emelkedett.



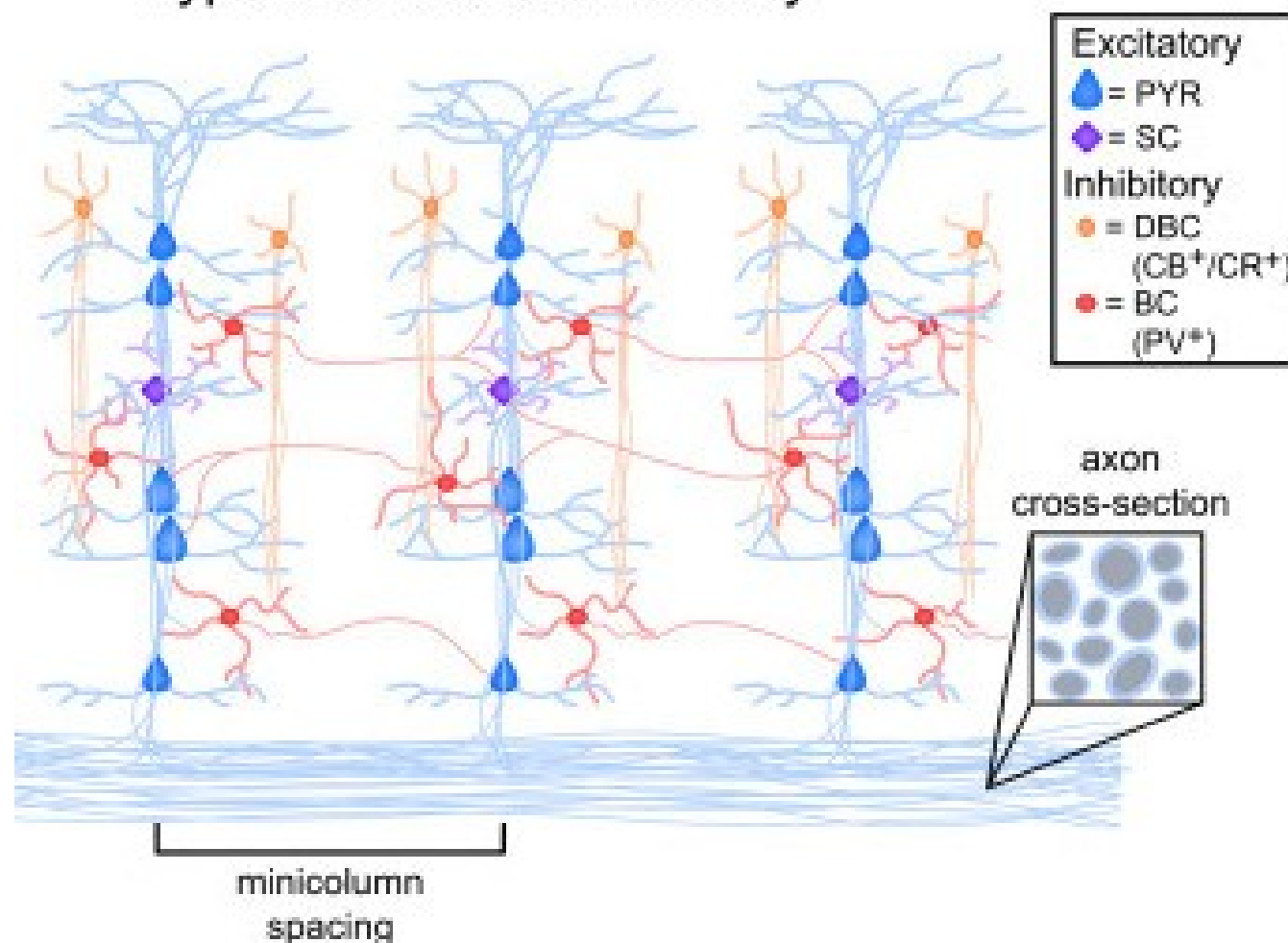
Neocortex inter-neuron típusai:

Morfológiájuk összes emlősben hasonló, fejlődésük, méretük, számuk nem.

Rágcsálókban <15%-a primátákban >20% a sejteknek.

Primátákban a kamrafal epitheliumában is keletkeznek interneuronok.

Typical Circuit Connectivity

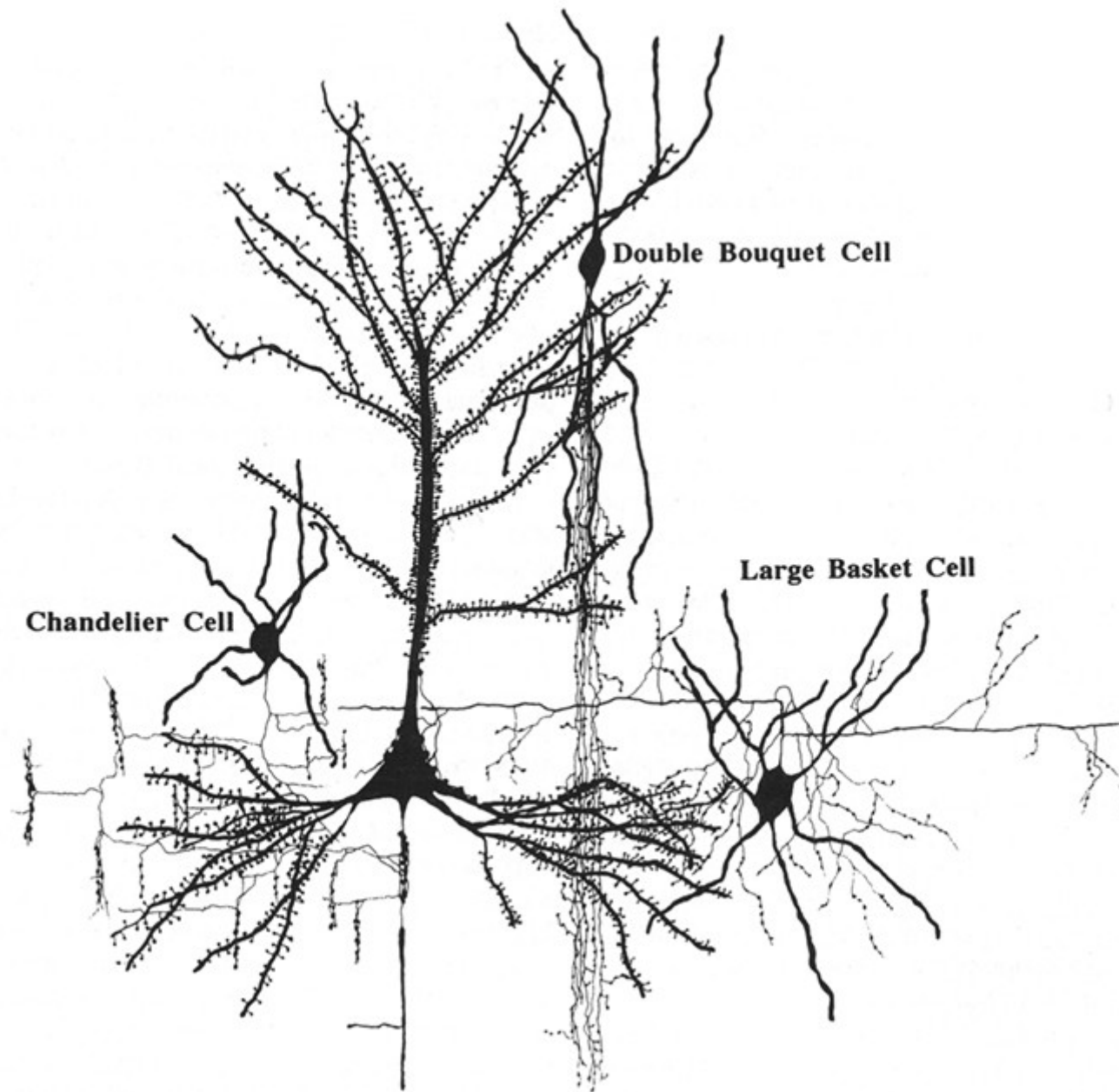


CB- és CR-ir neuronok columnákon belüli míg PV-ir neuronok columnák közötti kommunikációban vesznek részt.

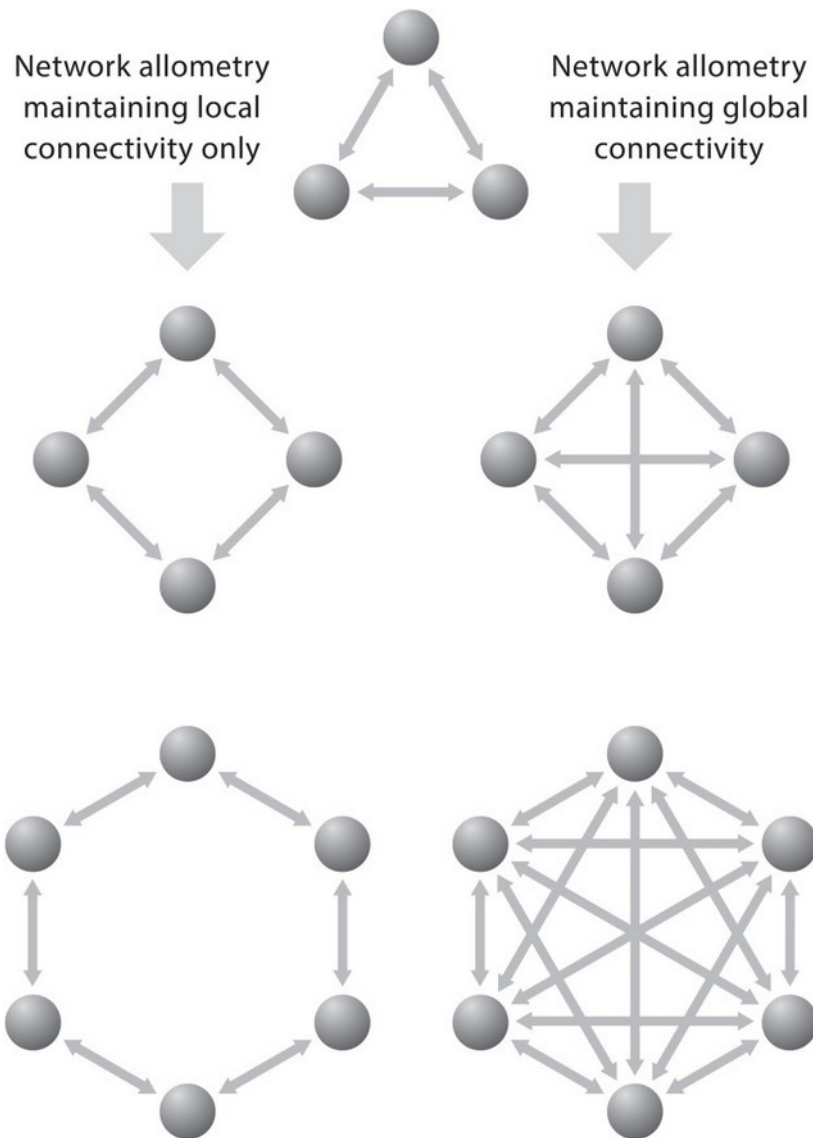
CB- és CR-ir sejtek főleg piramissejt dendriteken végződnek több réteget átfog az axonjuk.

A PV-ir sejtek több oszlop piramissejtjét idegzik be, a kosársejtek periszomatikusan, a kandelláber sejtek pedig

az axon iniciális szegmentjén.



Főemlősökben a kettőscsokor sejtek viszonylag gyakoriak és egyenletesen helyezkednek el a neocortex oszlopaihoz igazodva. Nagy számú gátló szinapszist adnak a piramissejt vékony dendritjeire több rétegben is. Nincs ilyen sejt rágcsálókban vagy nyúlalakúakban, de néhány ragadozóban van.



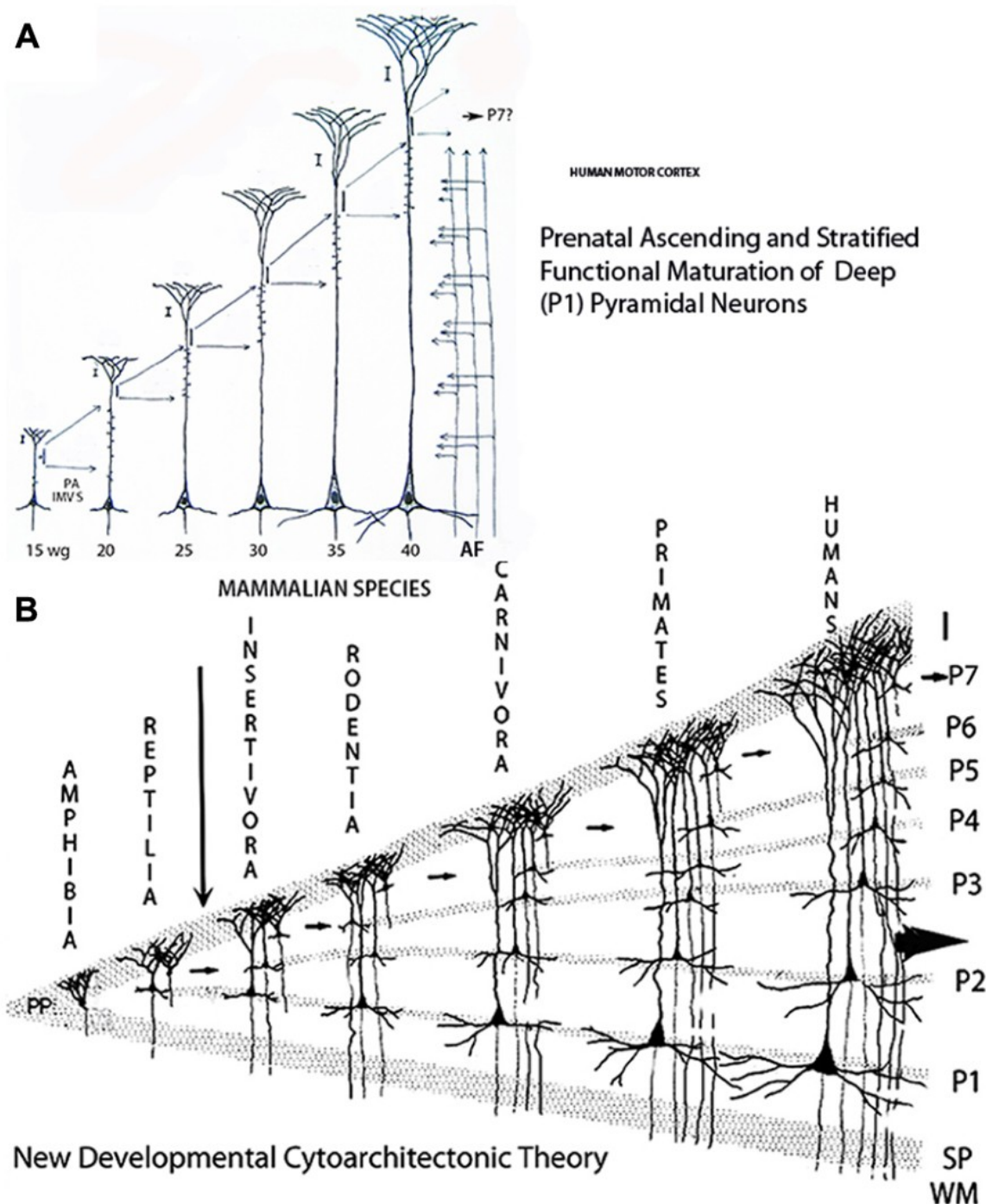
A neocortikális oszlopok számának növekedését a szükséges összeköttetések mennyisége, és az információ szállítás ideje limitálja.

Nagyméretű agynál előtérbe kerül az egyes részek specializálódása, lateralizáció. Embernél azok a működések amelyek nagy mértékű lokális információ feldolgozást és szekvenciális kontrollt igényelnek, mint a beszéd, az egyik féltekében alakulnak ki.

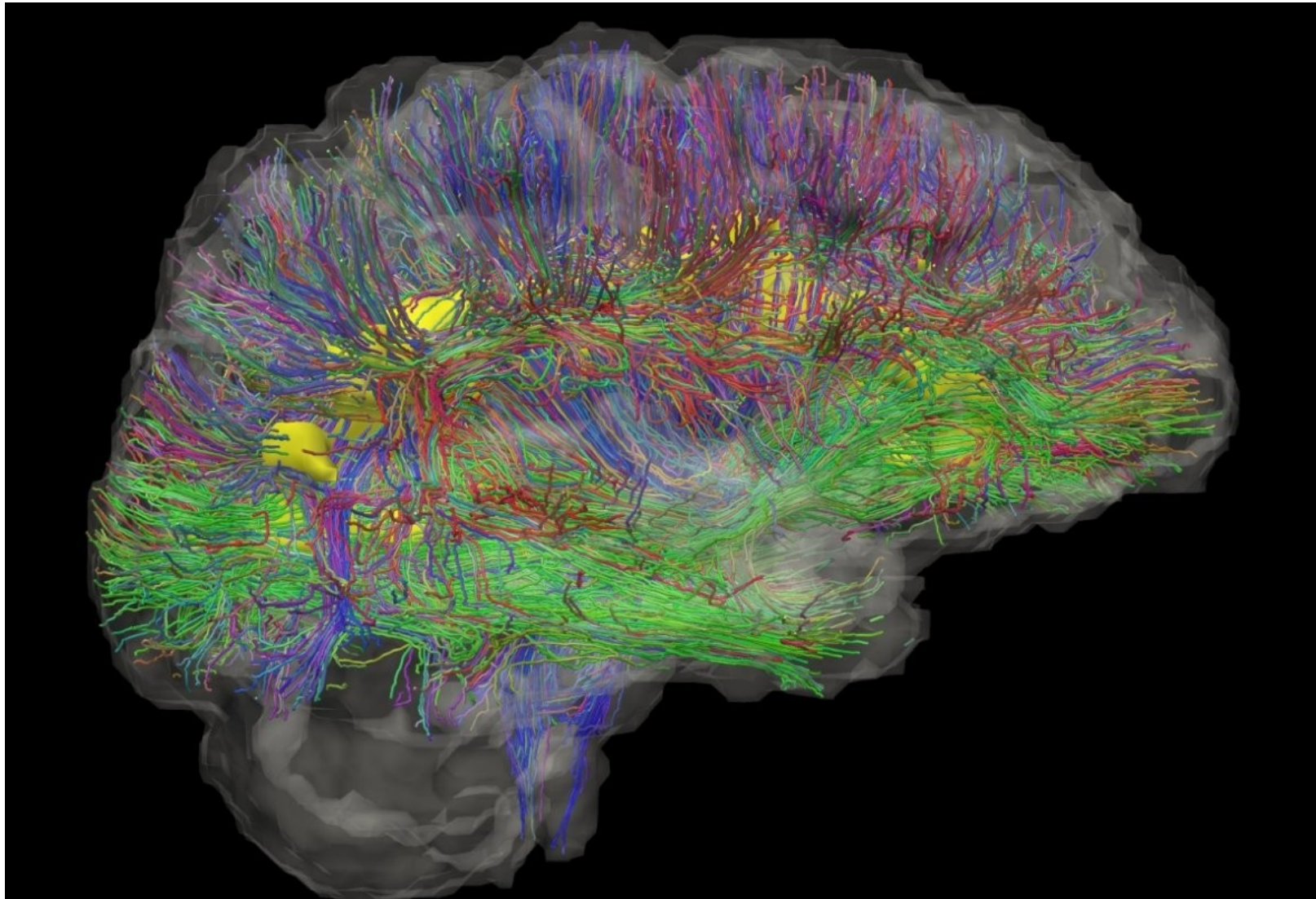
Lokális összeköttetéseket tartalmazó hálózathoz az összeköttetések száma az elemek számával lineárisan nő, míg olyan hálózathoz, ahol minden elem mindegyikkel kapcsolatban van hatványosan.

Motoros kéreg szerveződése:

Embrionális 8-15. héten új endimális eredetű piramissejtek jelennek meg, és különböző új rétegeket hoznak létre. Születéskor is maradnak Differenciálatlan sejtek, ezek új környezeti igények esetén újabb réteget és újabb mozgásformát alakíthatnak ki. A piramissejt rétegek száma a motoros kéregben az emlősfaj motoros képességeire utal: südisznónak 2 réteg, egér 3, macska 4 primataknak 5 ember 6: beszéd, írás, és elvont mozgástervezés alapja.



Összességében az emberi agyat nemcsak mérete teszi különlegessé, hanem szerveződése is.



Maximális agyméret:

Energetikai szempontokat is figyelembe véve (energiaellátás, hűtés), illetve az optimális információszállítási időt figyelembe véve a maximális kognitív kapacitáshoz tartozó agyméret 3500cm^3 .

Ez a jelenlegi specializációt és összeköttetési struktúrát veszi alapul, ha nagyobb fokú lateralizációt, új struktúra kialakulását vagy az egyes áréák nagyobb fokú specializációját feltételezzük, akkor nagyobb méretű agy optimális működése is elképzelhető (Hofman 2014).



[Star Trek Talosians](#)

Forrás:

Hofman (2014) Evolution of the human brain: when bigger is better. Front. Neuroanat. 8:15. doi: [10.3389/fnana.2014.00015](https://doi.org/10.3389/fnana.2014.00015)

Roth and Dicke (2005) Evolution of the brain and intelligence Trends Cognit. Sci. 9:250-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.005>

Sakai et al. (2012) Developmental patterns of chimpanzee cerebral tissues provide important clues for understanding the remarkable enlargement of the human brain. [Proc Biol Sci.](#) 280:20122398. doi: 10.1098/rspb.2012.2398.

DeFelipe (2011) The evolution of the brain, the human nature of cortical circuits, and intellectual creativity. Front. Neuroanat., 5:29 <https://doi.org/10.3389/fnana.2011.00029>

Marin-Padilla M (2014) The mammalian neocortex new pyramidal neuron: a new conception Front. Neuroanat., 06 January <https://doi.org/10.3389/fnana.2013.00051>

Raghanti MA et al. (2010) A comparative perspective on minicolumns and inhibitory GABAergic interneurons in the neocortex. Front Neuroanat., 05 February | <https://doi.org/10.3389/neuro.05.003.2010>

[Burkart, Judith M](#); [Schubiger, Michèle N](#); [van Schaik, Carel P](#) (2017). *The evolution of general intelligence*. Behavioral and Brain Sciences, 40:e195.

https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/2011_0001_520_altalanos_pszichologia3/ch18s02.html

Lakatos, L., & Janka, Z. (2008). Az emberi agy és intelligencia evolúciója [Evolution of human brain and intelligence]. *Ideggyógyászati szemle*, 61(7-8), 220–229.

Sepherd GM. The microcircuit concept applied to cortical evolution: from three-layer to six-layer cortex Front. Neuroanat., 2011 doi: 10.3389