

Az emberi agy evolúciója

Emberi agy mérete kapacitása:

100 billió neuron

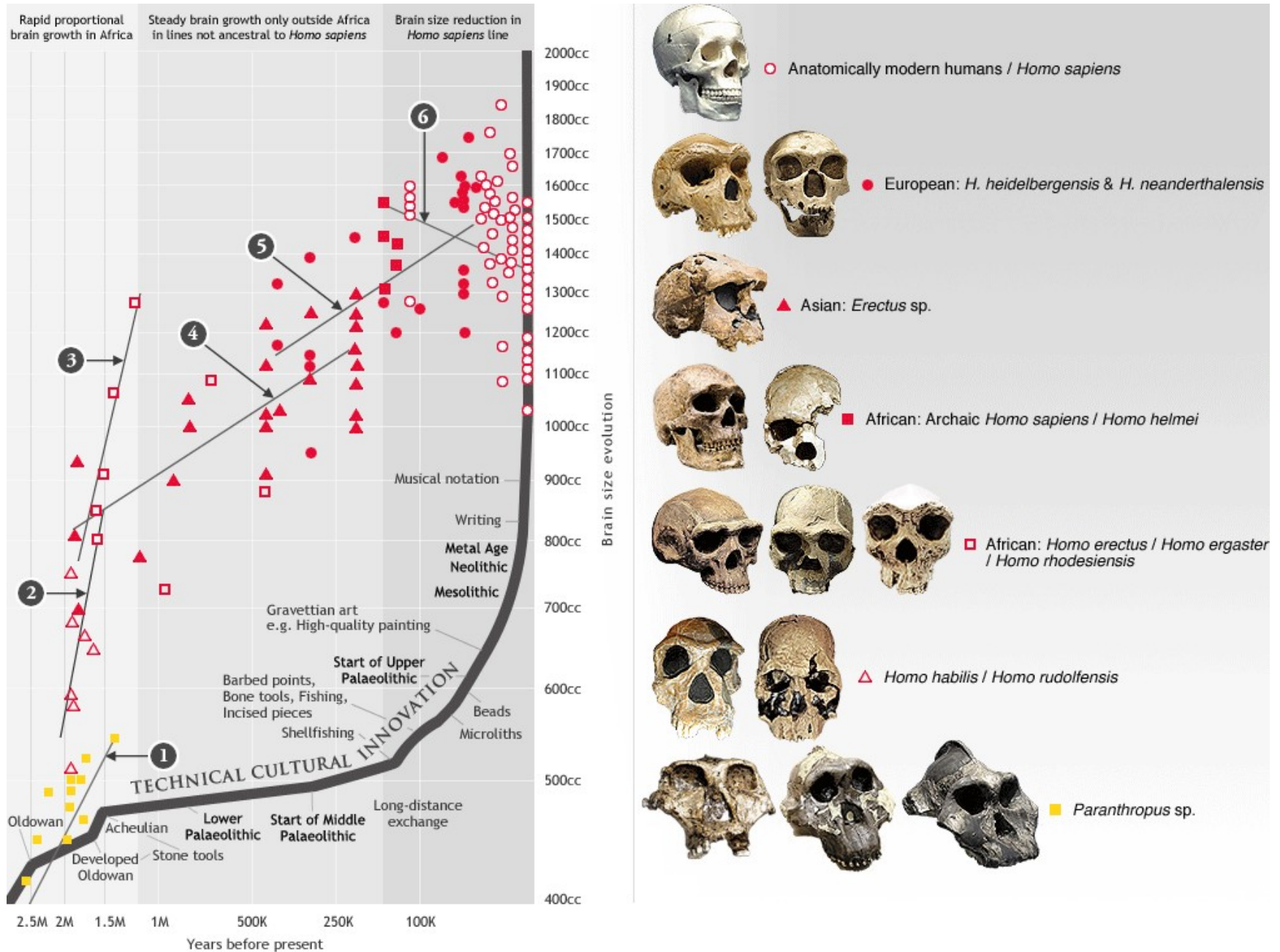
100,000 km nyúlványrendszer

1.25×10^{12} bájt tároló kapacitás

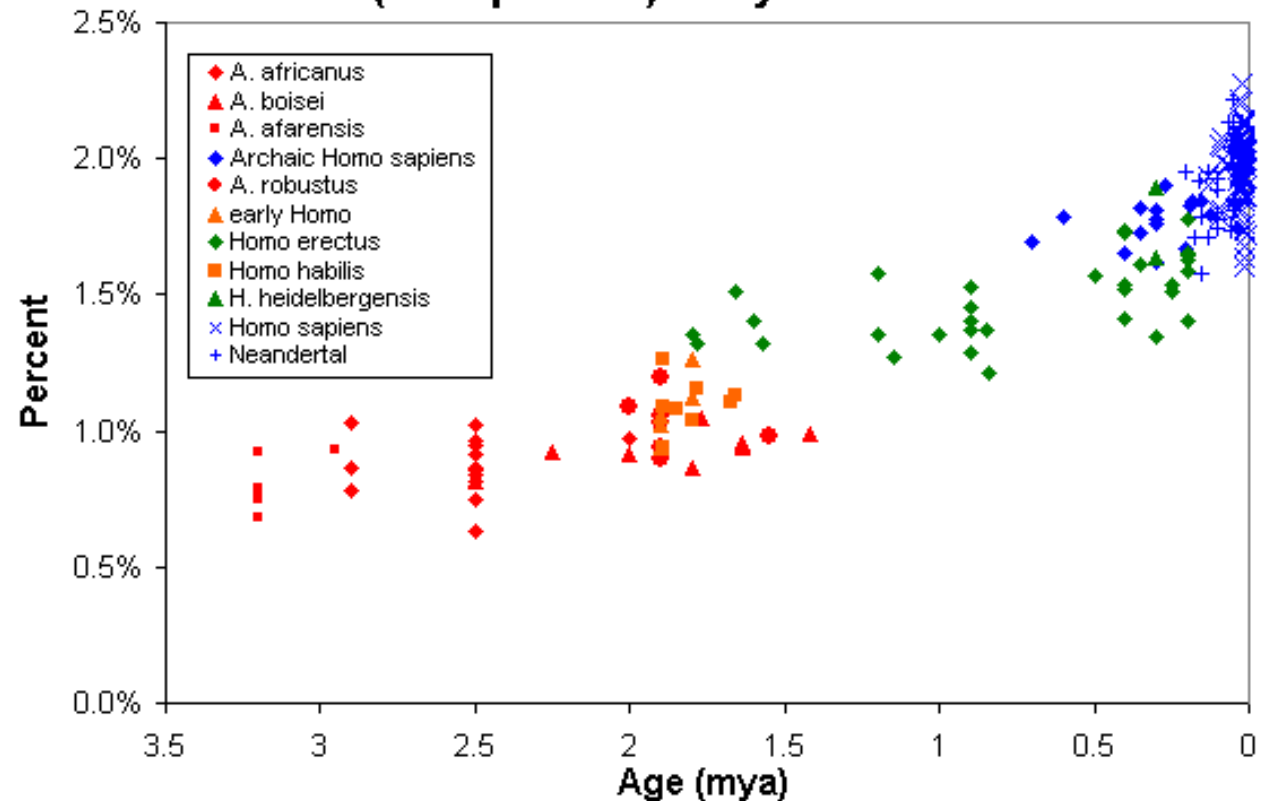
Ezek az impresszív számok vezettek ahhoz a feltételezéshez, hogy az emberi agy kognitív kapacitásai végtelenek.

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

Homoidák agymérete



Brain mass as percentage of (extrapolated) body mass



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** (Kaplan 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.**

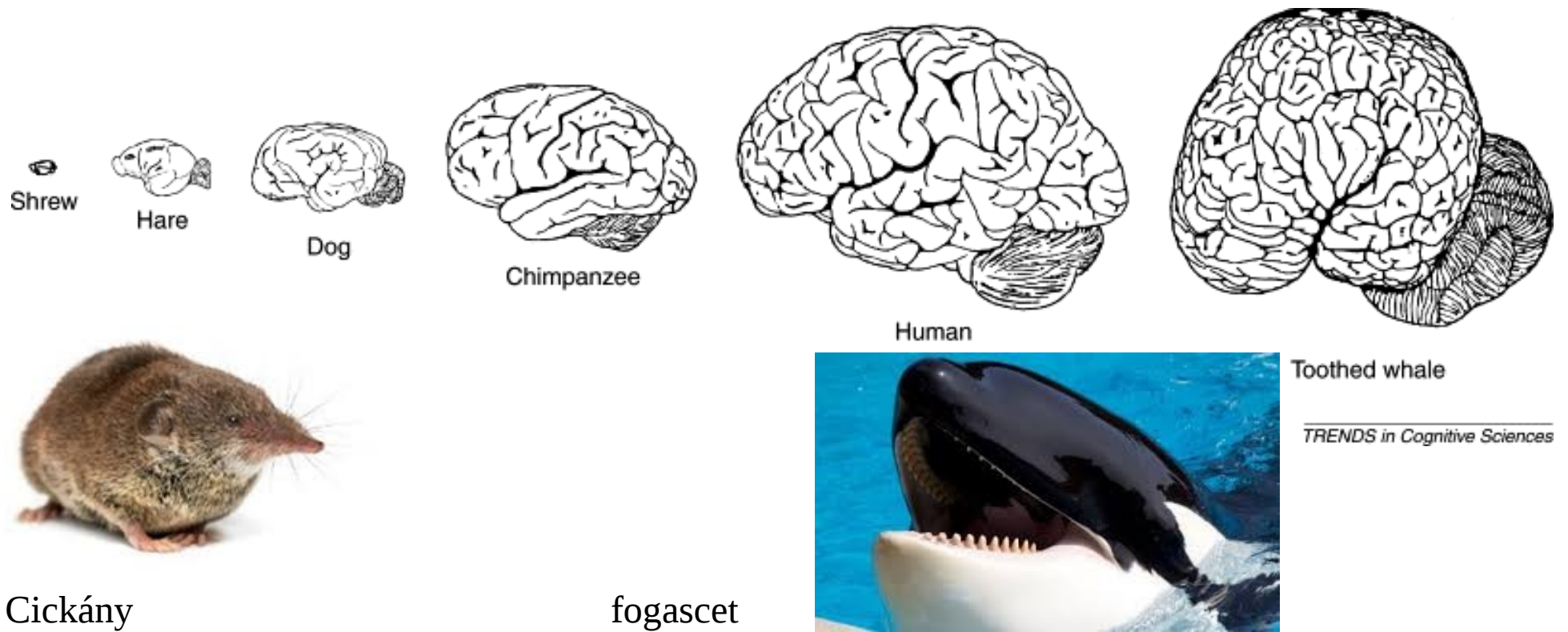
Chart by **Nick Matzke** of **NCSE** (www.ncseweb.org). Free to use for nonprofit educational use (with acknowledgement). Version 1.5, October 9, 2006.

Az 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.

Ebből következik, hogy 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 begyűjtésének, több emléknymom tárolásának igénye az agy megfelelő területeinek növekedése irányába hat, míg a gyors feldolgozás a minél rövidebb inger vezetési idő, rövid axon hosszúság irányába hat.



Biológiai intelligencia:

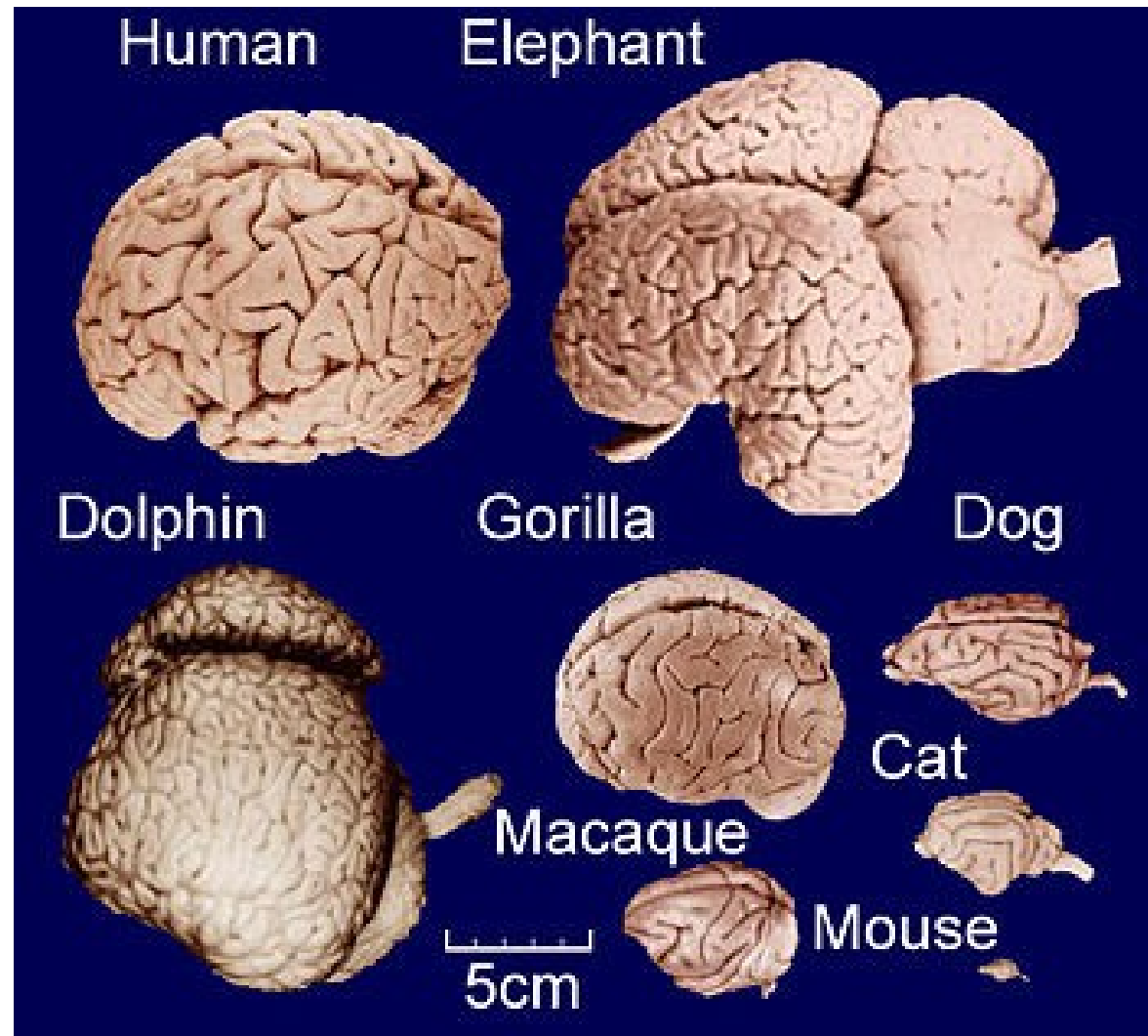
Intelligencia az emberek gondolkodási, alkalmazkodási, tanulási képességeivel függ össze.

Biológiai intelligenciában a környezethez való alkalmazkodási képesség nyilvánul meg.

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

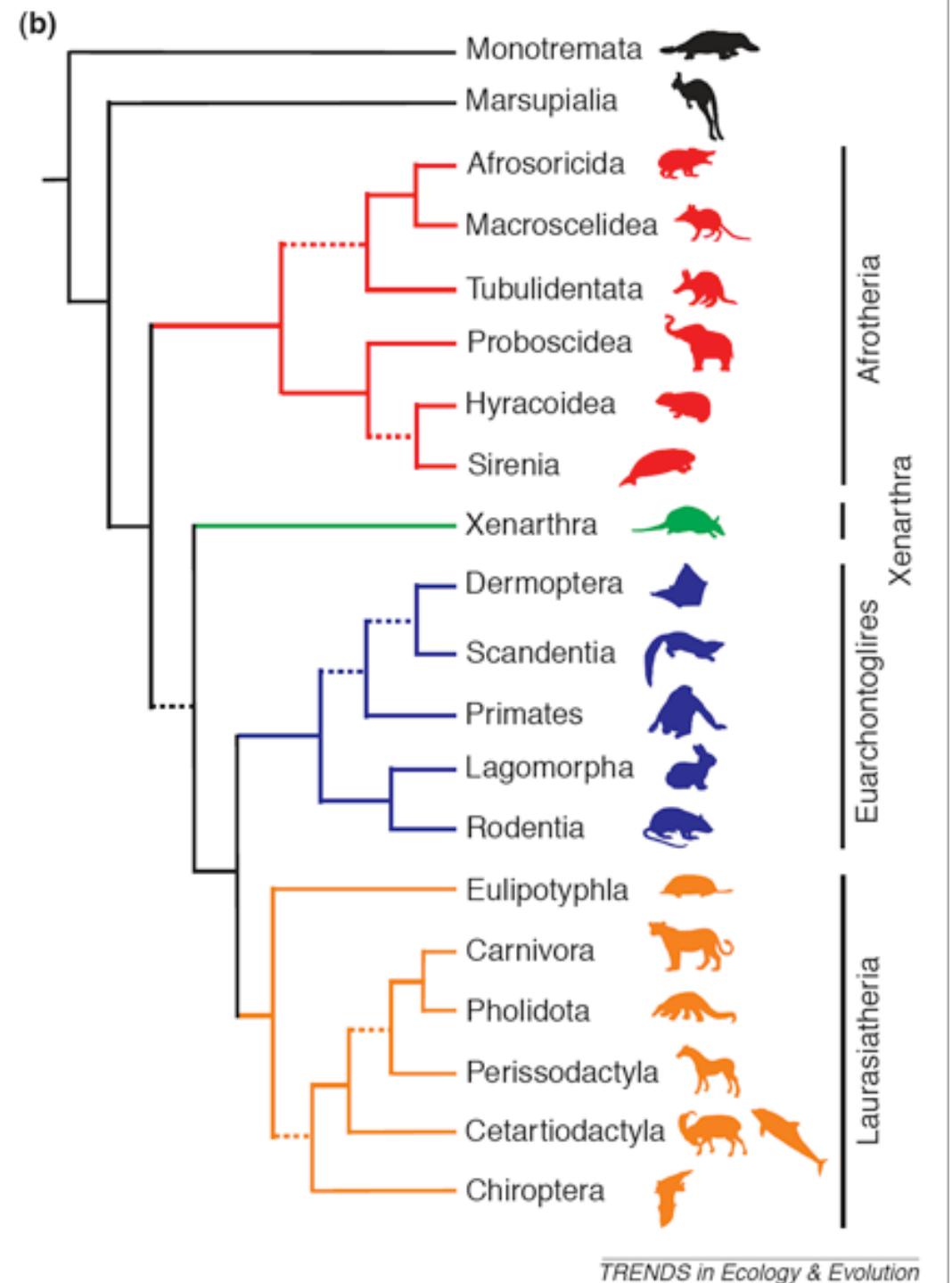
az egyes fajok intelligenciája tükröződik a fajok idegi struktúrájában, leginkább az agykérgi neuronális körök komplexitásában.

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 (cetek, emberek és elefántok).

A Vendégizületeseknél (lajhások, hangyászok stb) nem.



Agy jellemzői ami intelligenciával összefüggnek: agytömeg és testtömeg aránya, cortex és szubkortikális struktúrák aránya és prefrontális cortex relatív mérete.

Legjobb korrelációt a kortikális neuronok száma és az ingerületvezetés sebessége mutat az intelligenciával.

Embereknek kicsit több kortikális neuronja van mint az elefántnak vagy a bálnának, viszont kapcsolatrendszere komplexebb, mint ezeké az élőlényeké.

Az agyi evolúció: agykéreg arányának növekedése:

Emlősöknél szembetűnő evolúciós trend a nagyagykéreg erőteljes növekedése:

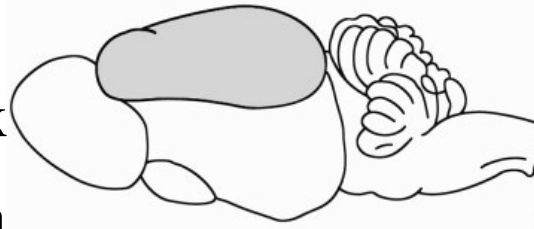
a főemlősöknél és a tengeri emlősöknél az agy nagy részét alkotja, rovarrevőkénél az agykérgi szürkeállomány a teljes agyi térfogat 25%-át adja addig az embernél 50%-át.

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

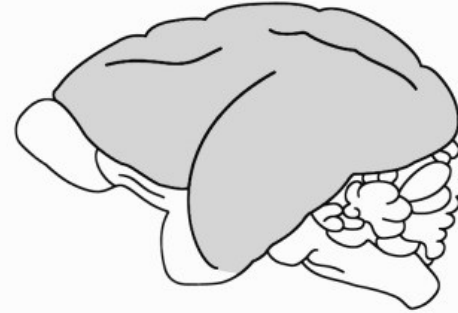
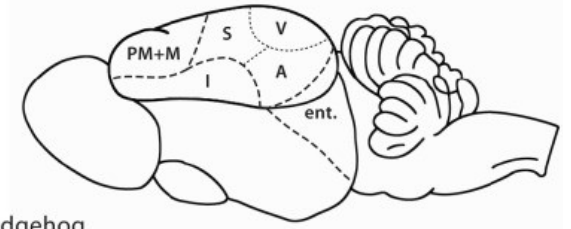
Kisagynál nincs ilyen növekedés: stabilan 10-15%-a a teljes agytömegnek.

Különböző emlősök agyának oldalnézeti képe jól mutatja a nagyagy (szürke) egyre növekvő arányát a többi struktúrához képest.

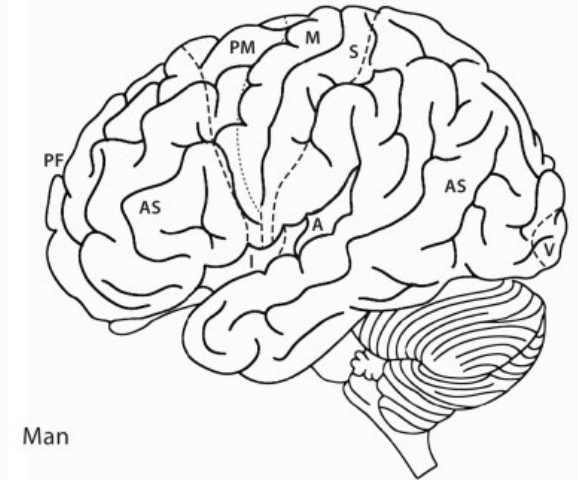
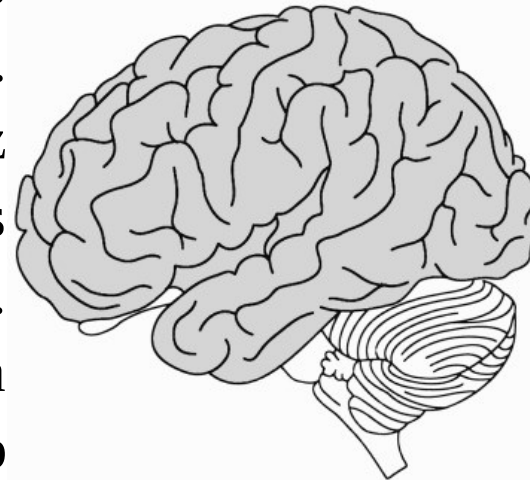
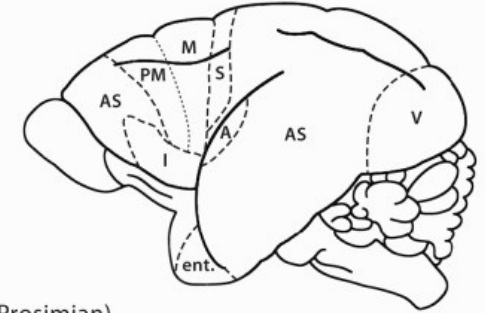
Sündisznóban (hedgehog) csak-nem a teljes neocortexet a szen-zoros és motoros területek foglalják el. Galagóban megjelenik az asszociációs (AS) kéreg a szenzoros kéreg között és fron-tálisan. Emberben ezeknek a területeknek a mérete tovább



Hedgehog



Galago (Prosimian)



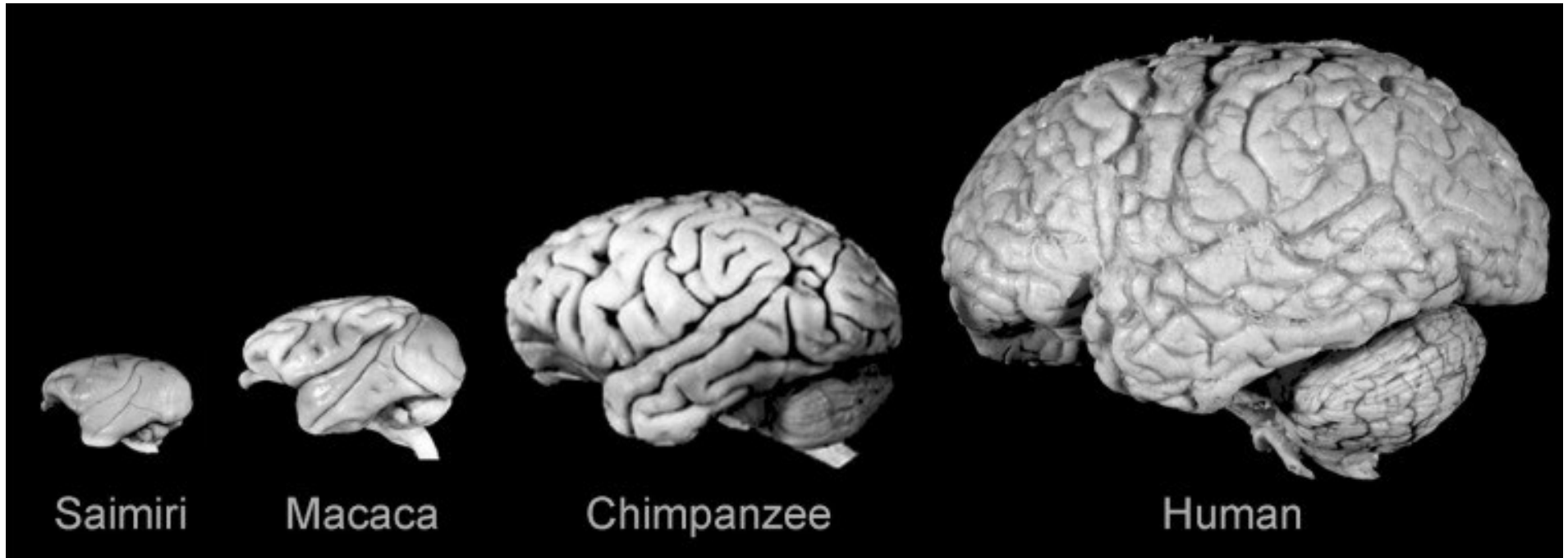
Man



nő.

A: primer hallókéreg, Ent: entorhinális kéreg, I: insula; M: primer motoros kéreg; PF: prefrontális kéreg; PM: premotoros kéreg; S: primer szomatoszenzoros kéreg; V: primer látókéreg.

A neocortikális neuronok neurogenesisének hossza jobban nő mint a többi agyterületé. Egy bizonyos méret felett a nagyméretű neocortex csak barázdálódva fér el a szubkortikális struktúrákon.



Emberszabású főemlősök agyának laterális képe mutatja a neocortex növekedését. Mókusmajmokban 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.

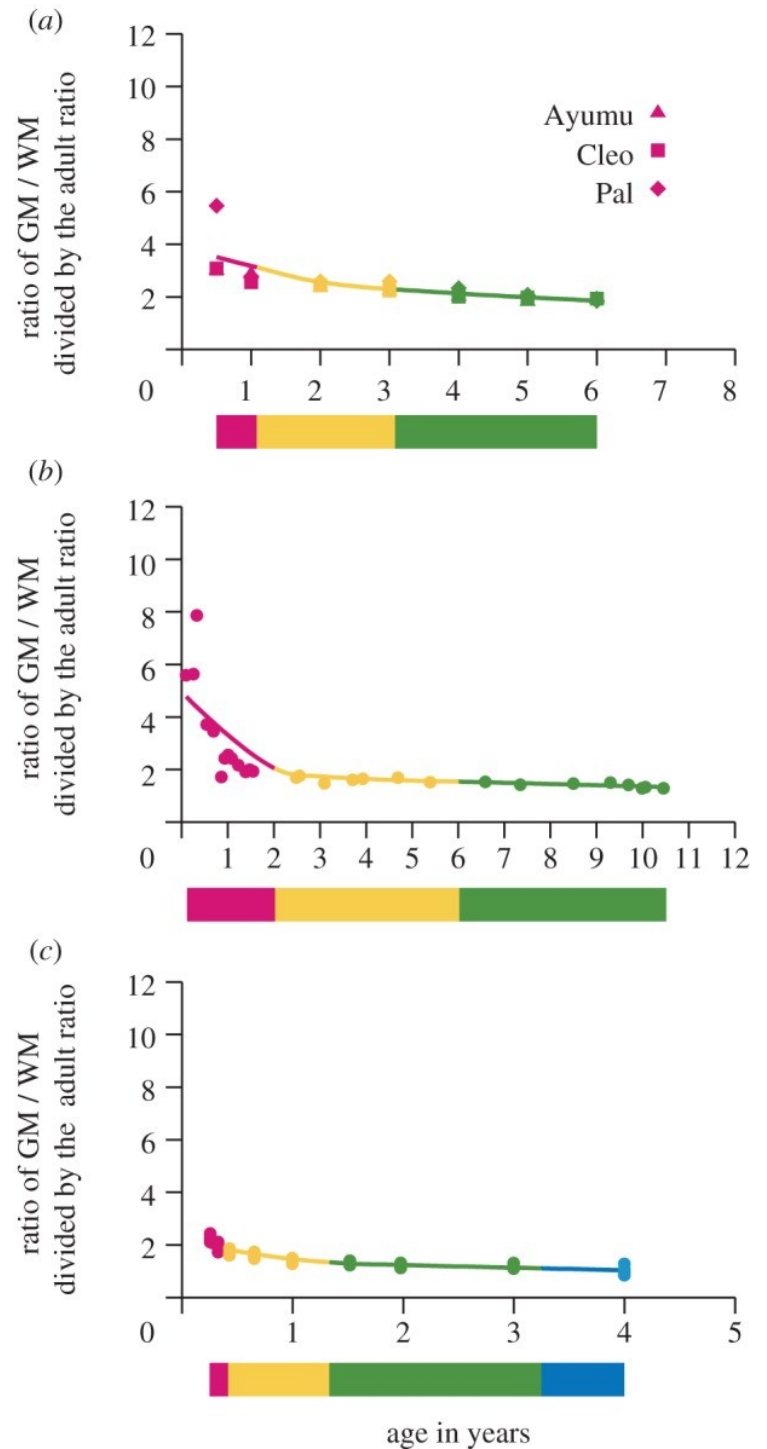
Humán agy ontogenezise

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

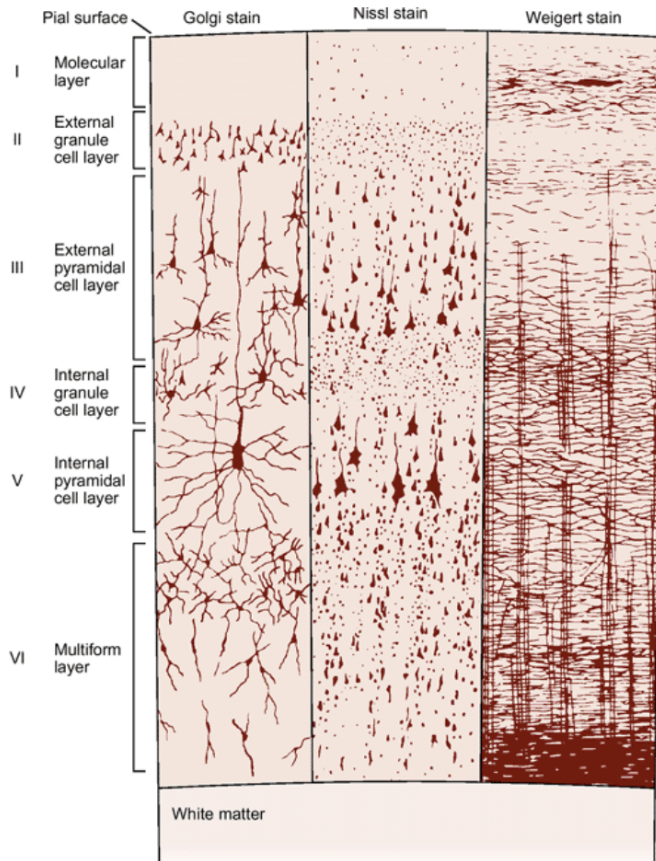
Magenta: csecsmőkor, sárga: kisgyermekkor, zöld: kölyökkor, kék: serdülőkor

Legnagyobb mértékű fehérállomány növekedés embernél.

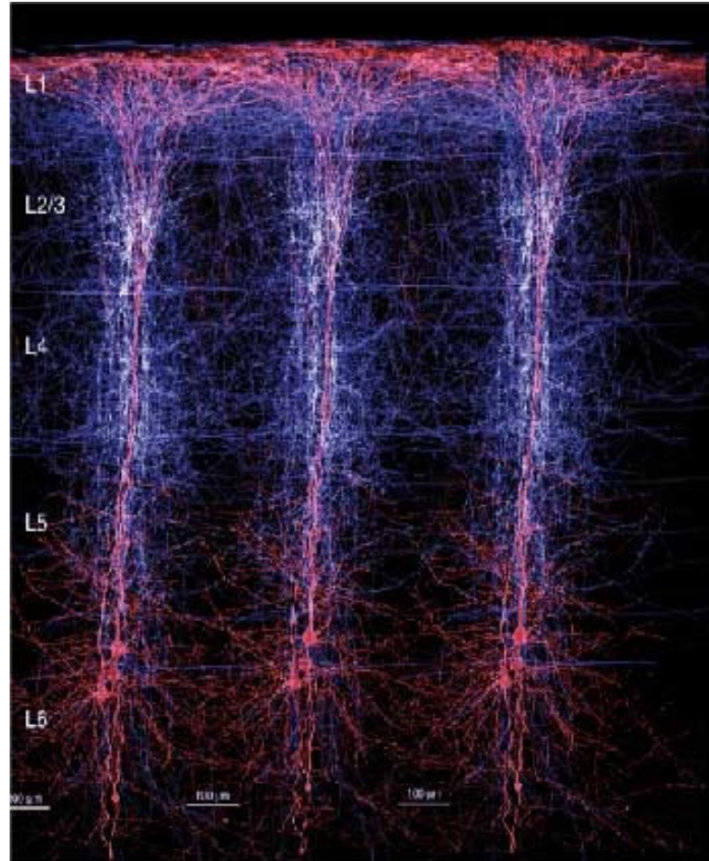
Az emberi agy mérete már a magzati 16. héten 2x nagyobb mint a csimpánzé. 22. héttől csimpánzagy növekedése lassul, emberi agy növekedése továbbra is gyorsabb, mint a többi szervé.



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-

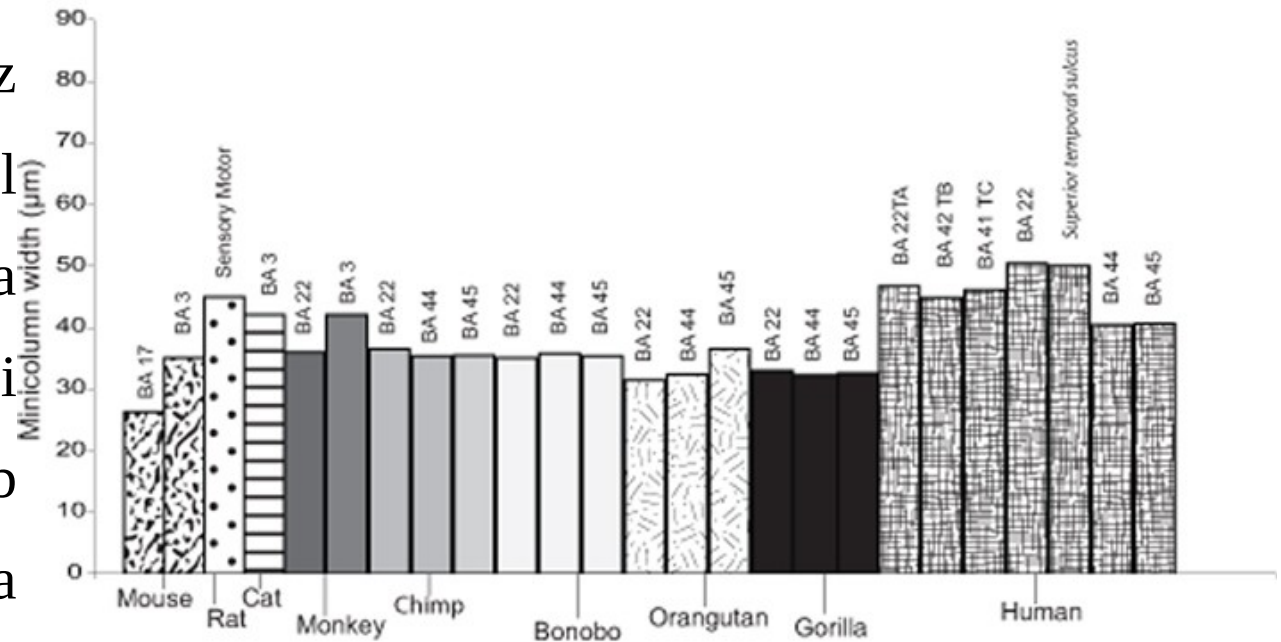
ló szerveződésű egységek hierarchikus szerveződése adja, ebben az elrendezésben az elemek kapcsolatát kisebb mennyiségű axonnal lehet biztosítani.

Pyramidal cell array

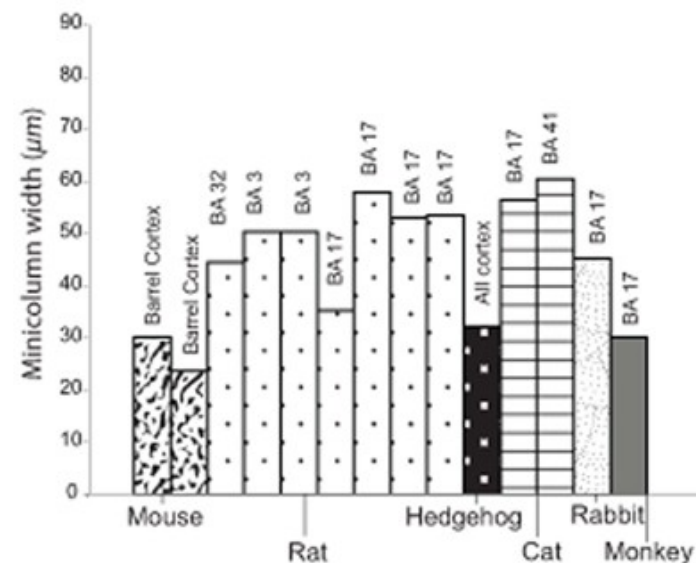
Mini-kolumnák:

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

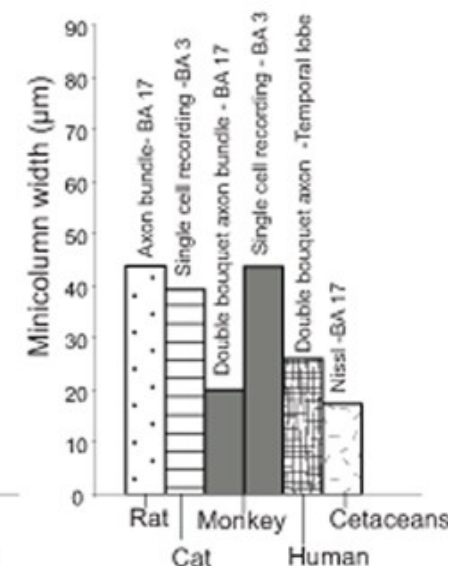
Emberben szélesebb mint a majmokban, alacsonyabb rendűekben lehet széles oszlop de abban kisebb a neuron sűrűség.



Apical dendrite bundle



Other methods

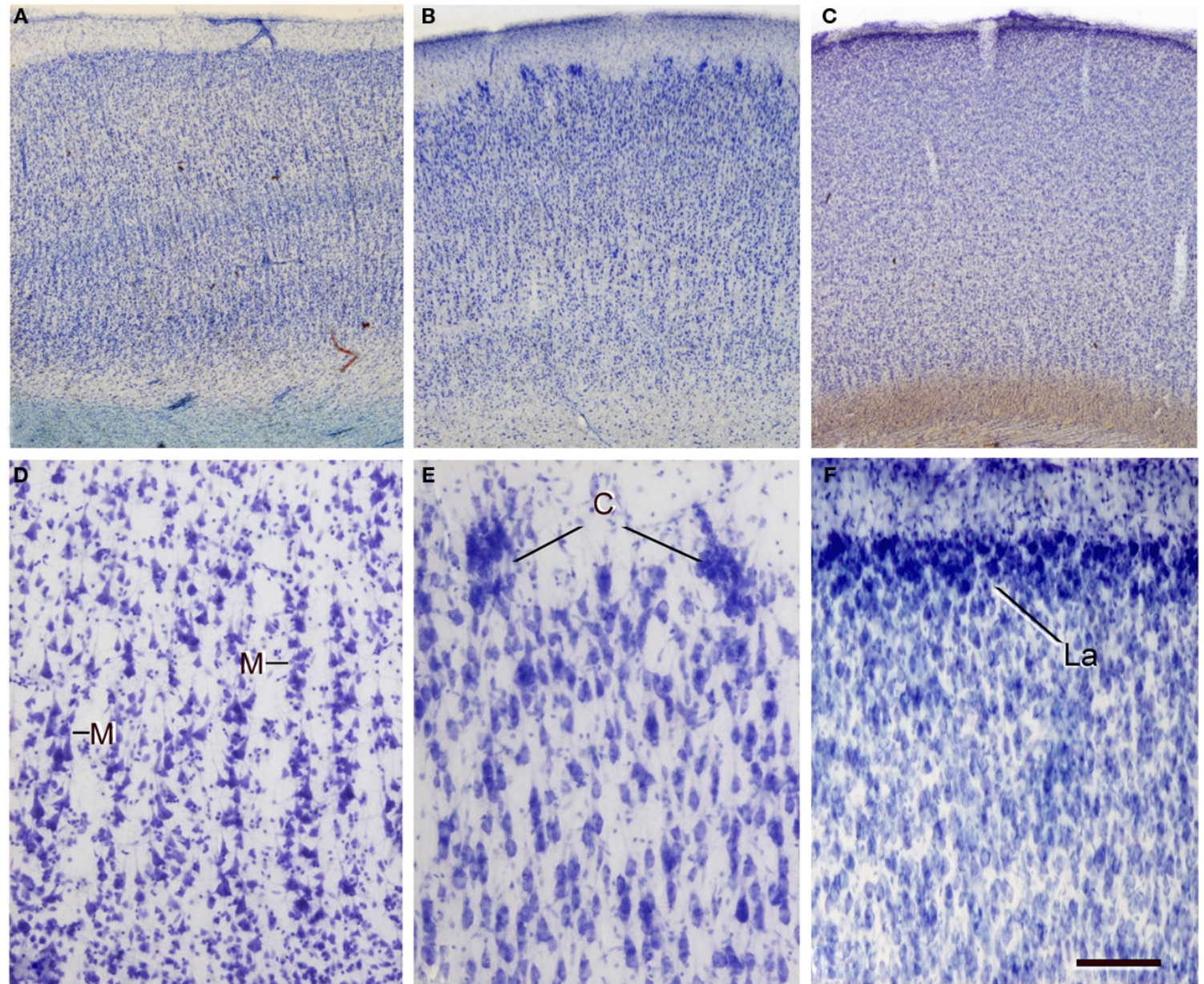


Neuron denzitás:

Tionin festés kis nagyítás: A) humán Brodmann 21, B) zsiráf látókéreg, kacsacsőrű emlős szomatoszenzoros kéreg.

Nagy nagyítás: citoarchitektuális különbségek: embernél oszlopszerű sejtcsoportok (M), zsiránál neuron csoportok (C), platypusnál sejtűs II. réteg (La).

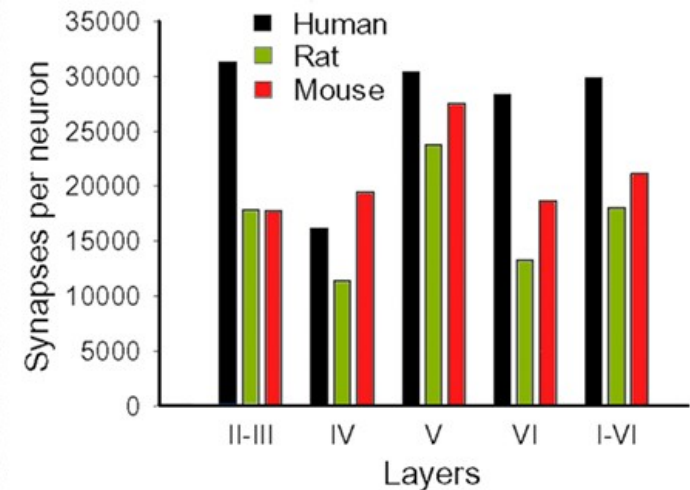
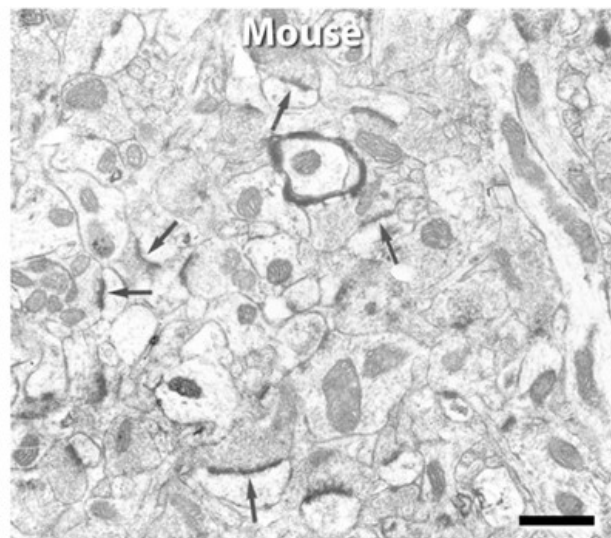
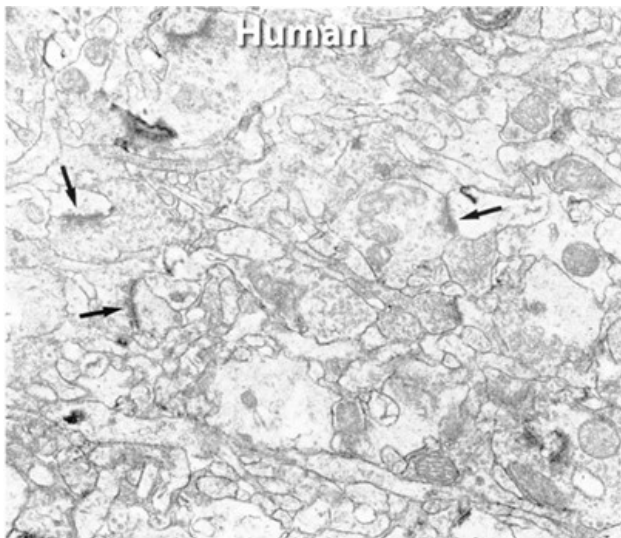
Scale bar: 710 μm in (A–C); 100 μm in (D–F).



Szinapsziszám:

Szinapsziszám 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:

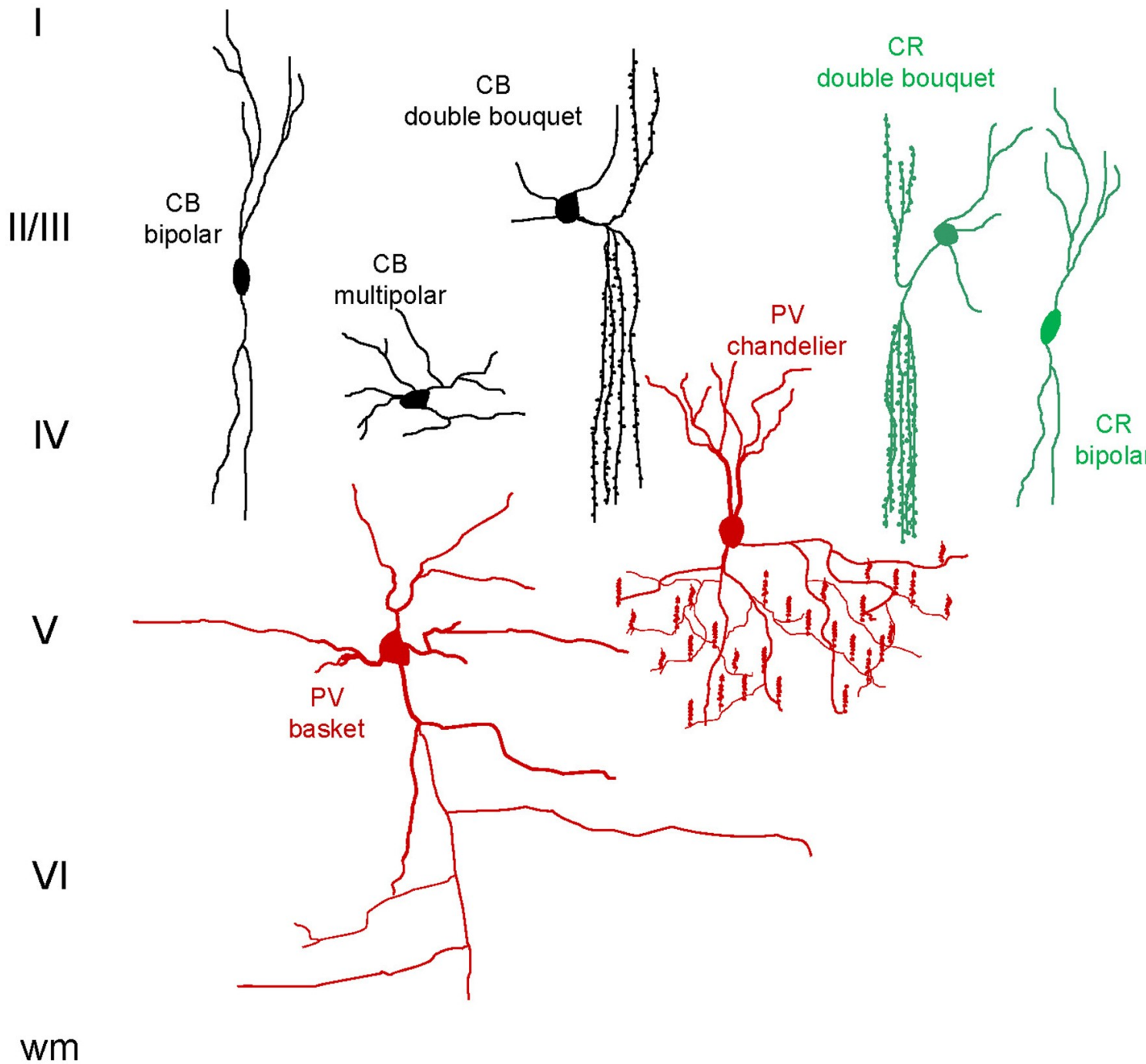
interneuron típusok fajonként eltérnek

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.

Csimpánzokkal 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.



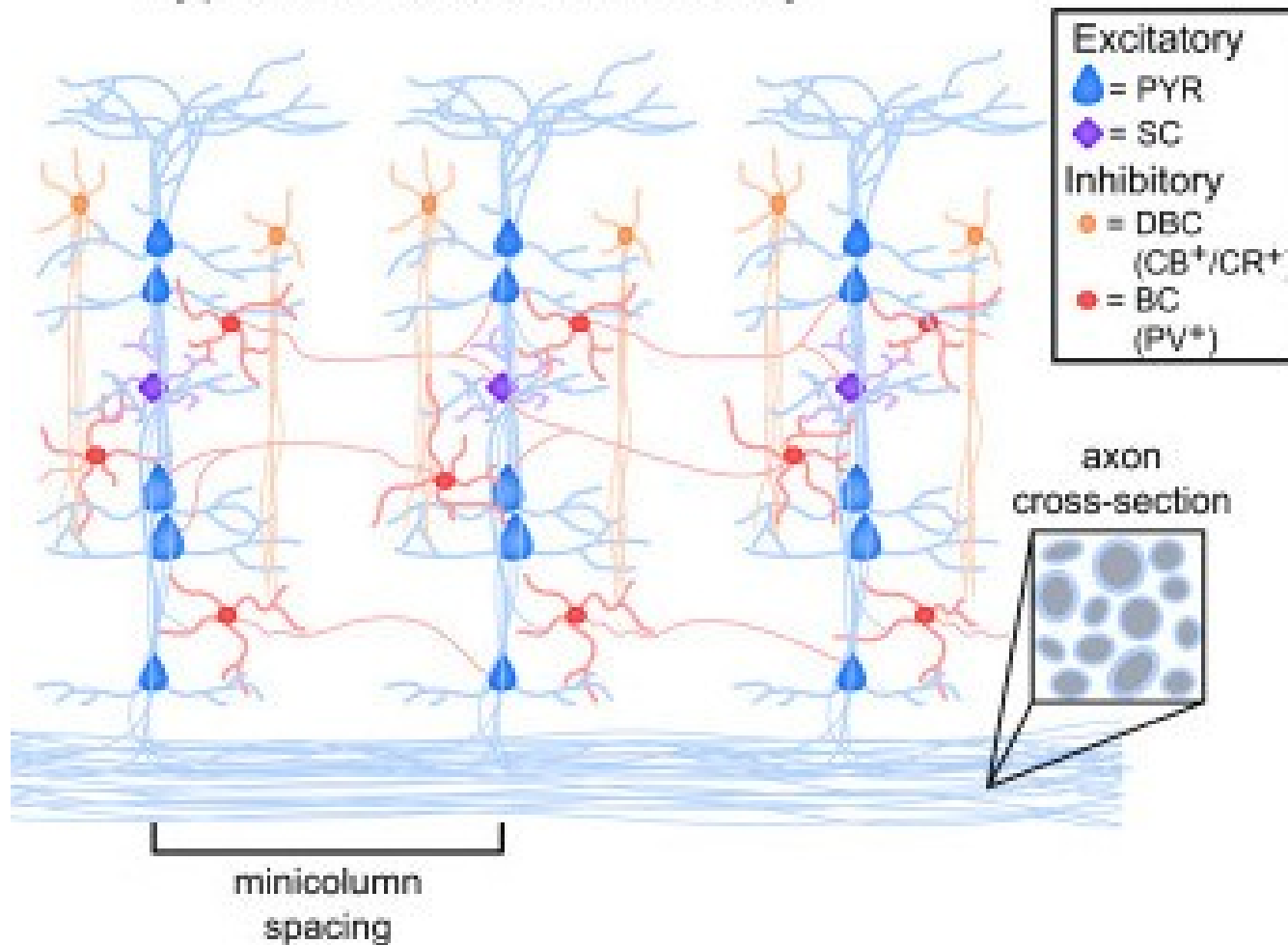
Neocortex interneuron típusai:

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

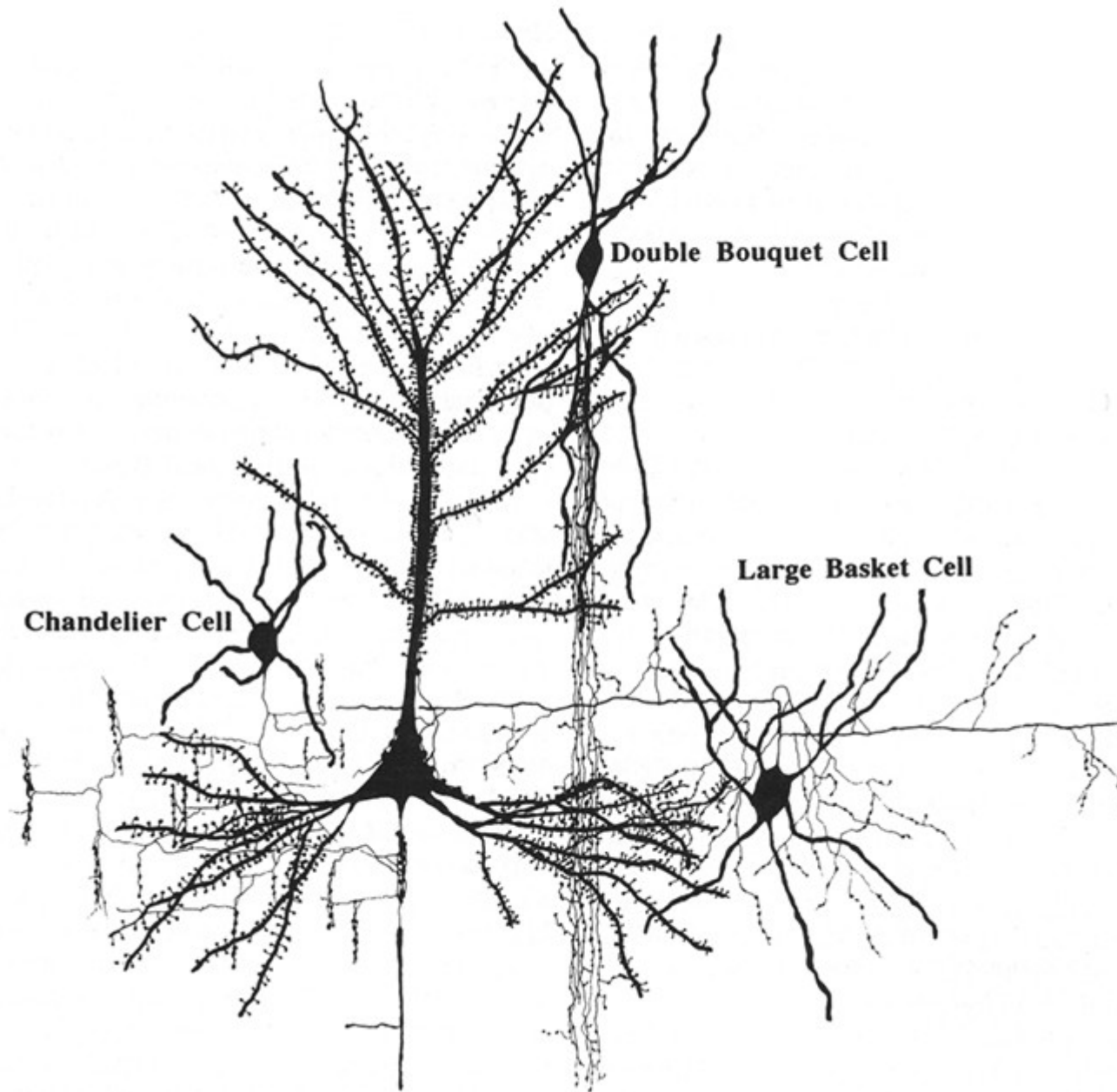


CB- és CR-ir neuronok columnákon belüli míg PV-ir neuronok columnák közötti kommunikációban vesznek részt.

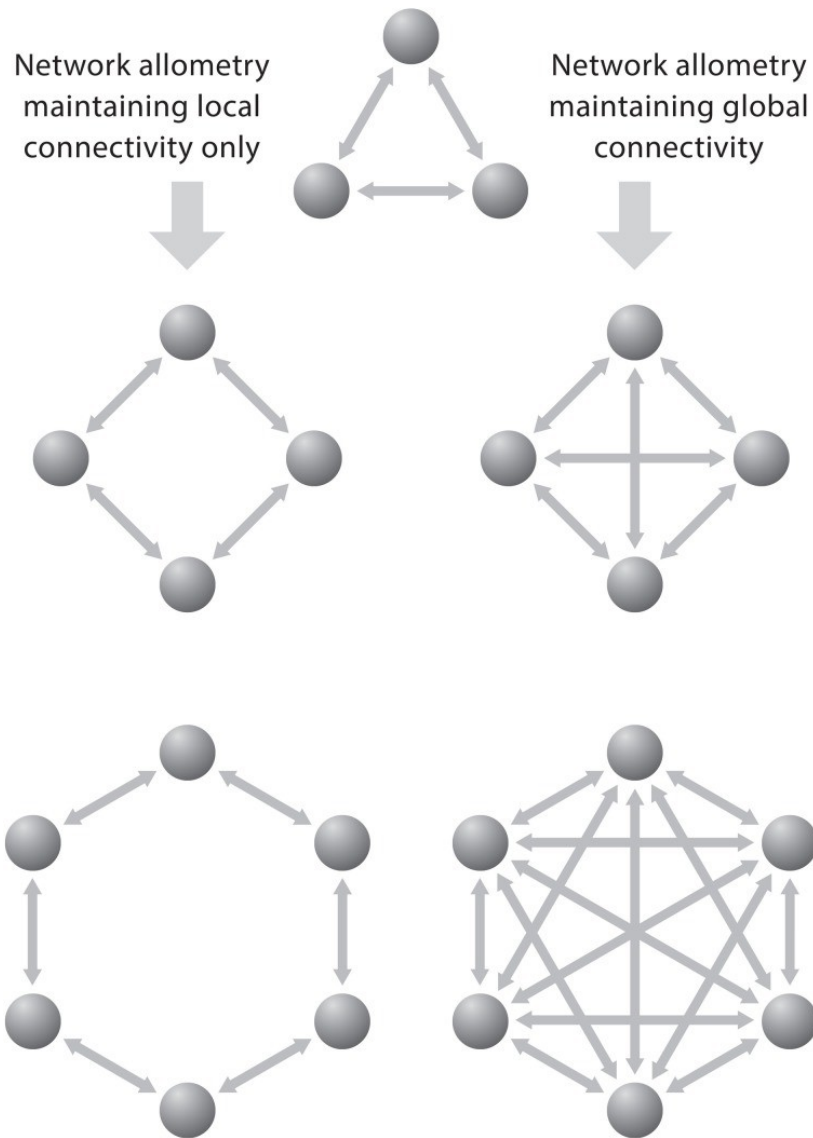
CB- és CR-ir sejtek főleg piramisajt dendriteken végződnek több réteget átfog az axonjuk.

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

az axon iniciális szegmentjén.



Főemlősökben a kettős-csokor 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.



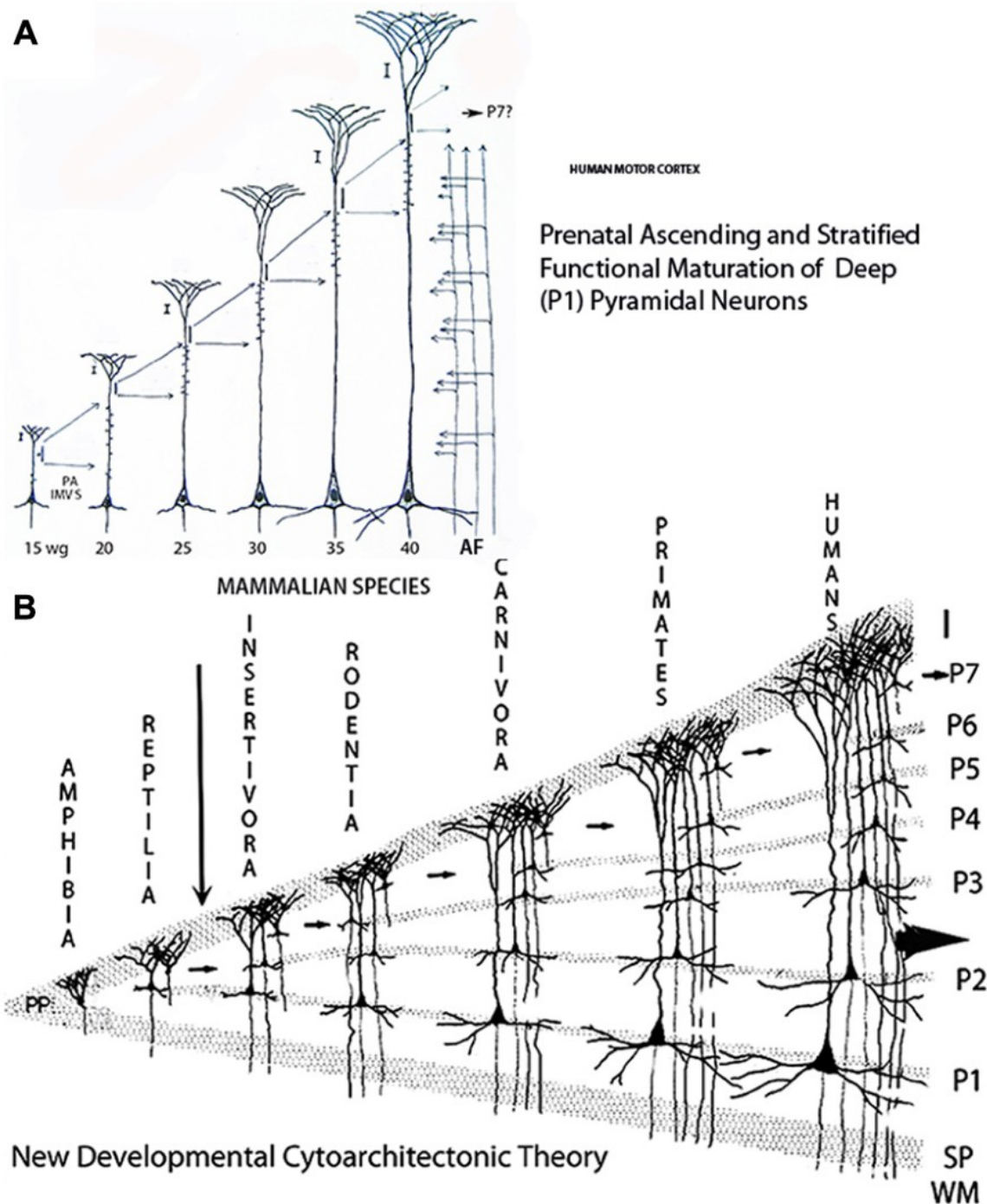
A neocortikális oszlopok számának növekedését a szükséges összeköttetések mennyisége, és az információ szállítás ideje limitálja.

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.

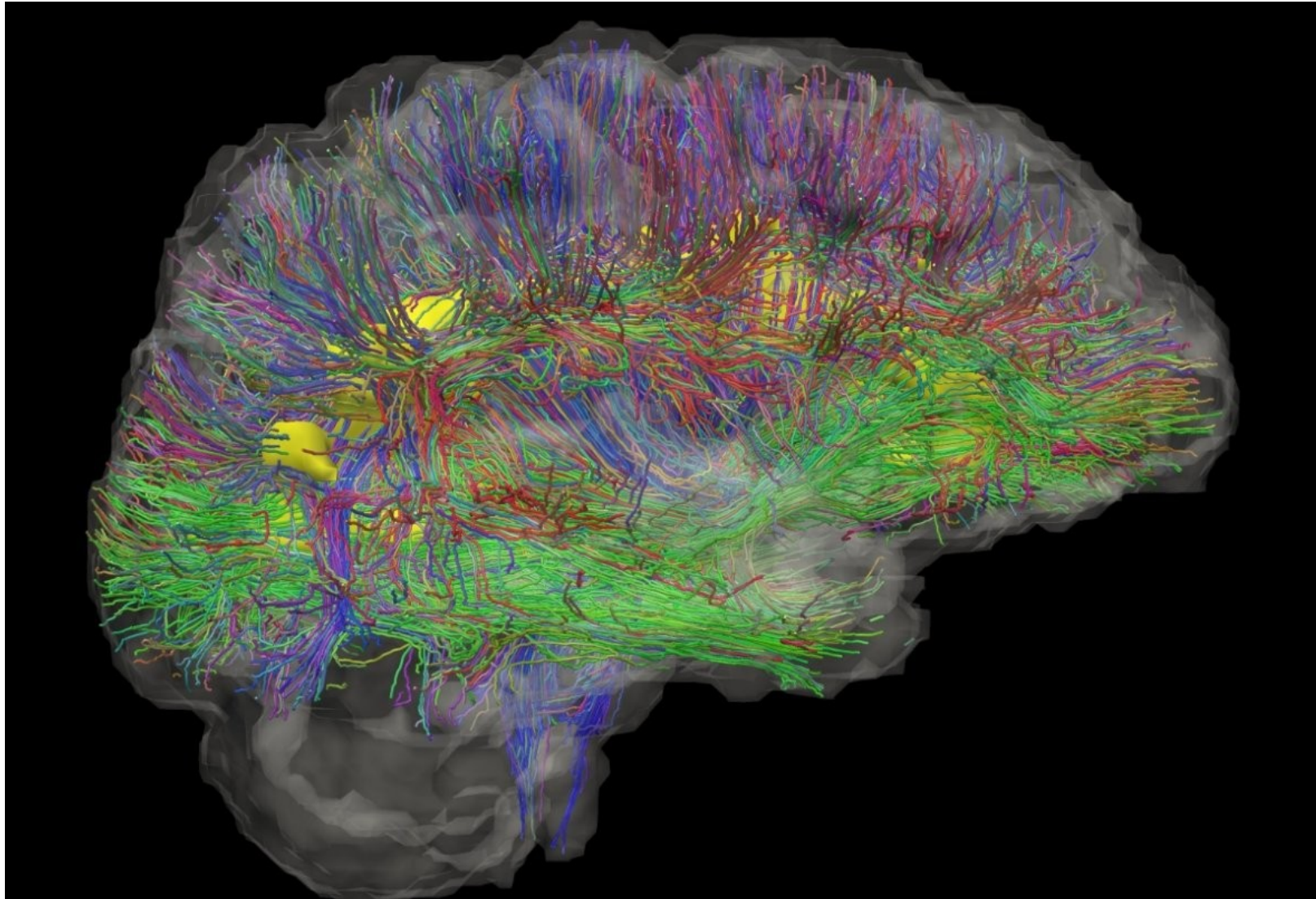
Lokális összeköttetéseket tartalmazó hálózatnál az összeköttetések száma az elemek számával lineárisan nő, míg olyan hálózatnál, ahol minden elem mindegyikkel kapcsolatban van hatványosan.

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: sündisznónak 2 réteg, egér 3, macska 4 primataknak 5 embernek 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>