

Statisztikai tanulás az idegrendszerben, 2019.

# Bevezetés

Bányai Mihály

banyai.mihaly@wigner.mta.hu

<http://golab.wigner.mta.hu/people/mihaly-banyai/>

# Modern idegtudomány

a [wired.com](http://wired.com) szerint

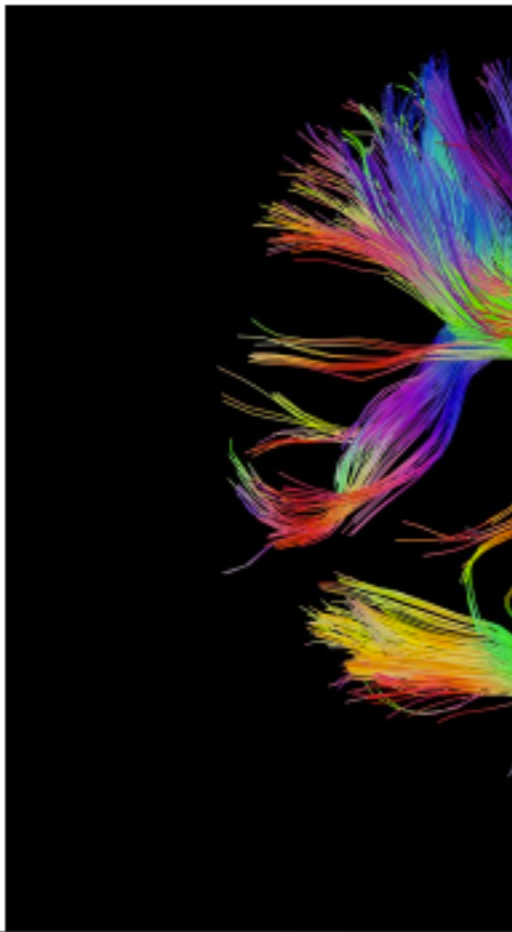
CHELSEA LEU SCIENCE 12.12.16 3:00 PM

## WATCH A RESTING BRAIN UP WITH ACTIVITY



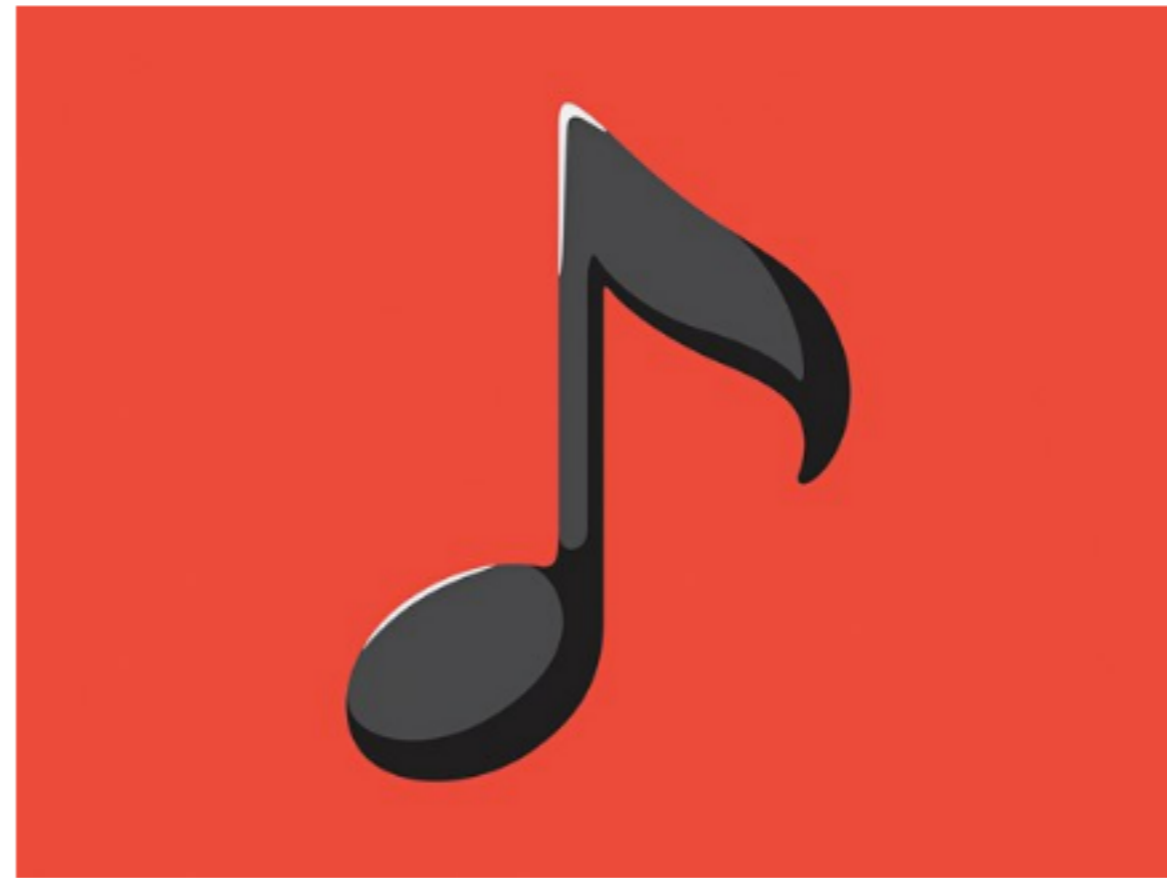
YING MA AND I

## VIBRANT NETWORKS REVEAL WHAT YOU



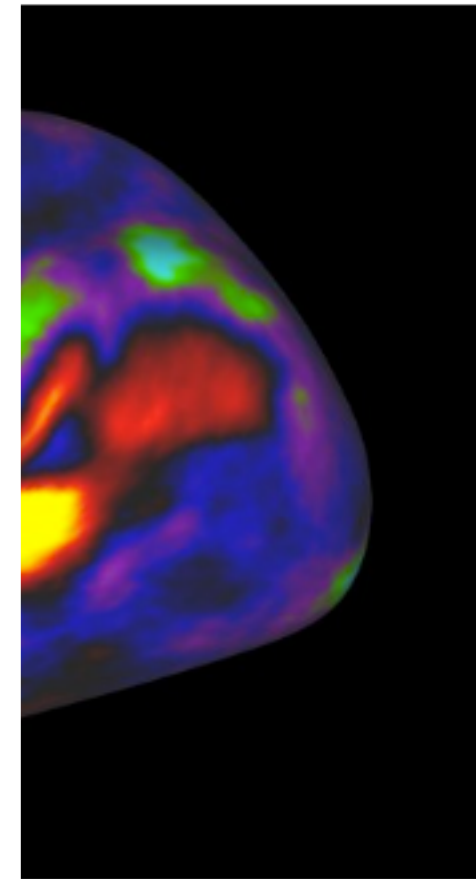
CHELSEA LEU SCIENCE 07.13.16 1:00 PM

## NEUROSCIENTISTS STILL DON'T KNOW WHY MUSIC SOUNDS GOOD



GETTY IMAGES

## BRAIN BOUNDARIES OF



activation (red, yellow) and deactivation (blue, green) in various brain regions in the MRI scanner. MATTHEW F.

# Hogyműködik az agy?

- Egy Google-keresés számos választ szolgáltat, és több Youtube-videót is találhatunk, ami válaszol a kérdésre
- De mit jelent egyáltalán ez a kérdés? Milyen jellegű válasz lenne elfogadható rá?
- Van válaszunk erre a kérdésre?

# Mesterséges intelligencia a [wired.com](http://www.wired.com) szerint

MEGAN MOLTENI SCIENCE 01.25.17 1:00 PM

## IF YOU LOOK AT V D R A V S O R

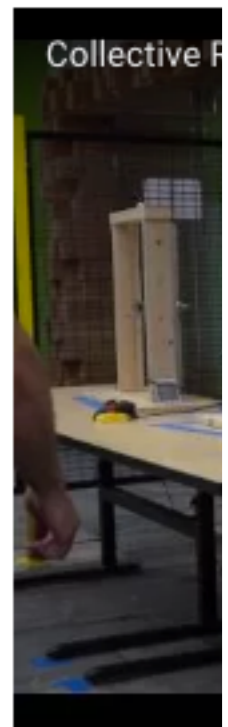
ASSAF BACIU BUSINESS 12.07.16 11:00 AM

## MOLES FOR A L ARTIFICIAL INTELLIGENCE IS COMING FOR YO MORE ARTIFICIAL THAN INTELLIGENT

10 AM

## UST CRUSHED IN PLAYERS AT

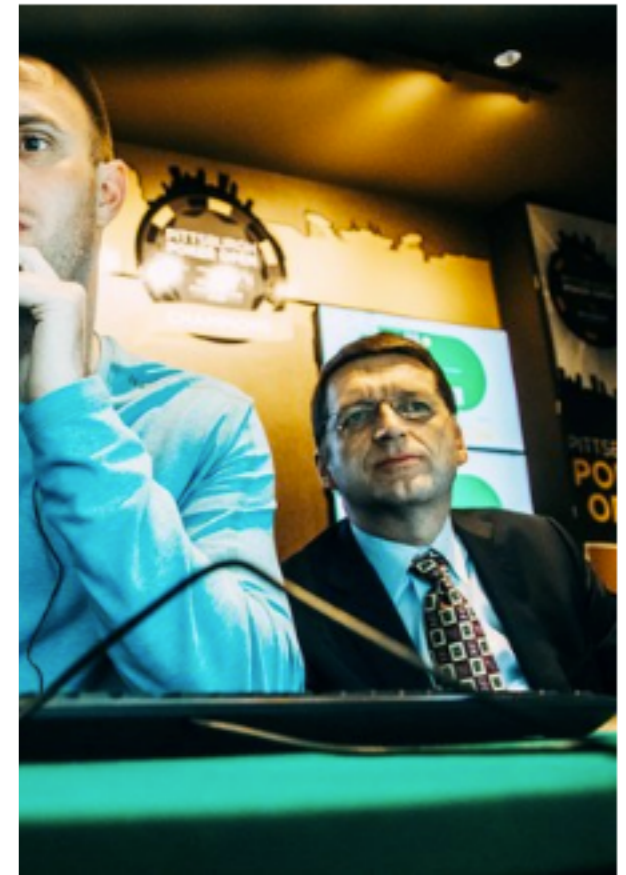
CADE METZ B  
GOOG  
OPENS  
THAT



MATT YOUNG



GETTY IMAGES



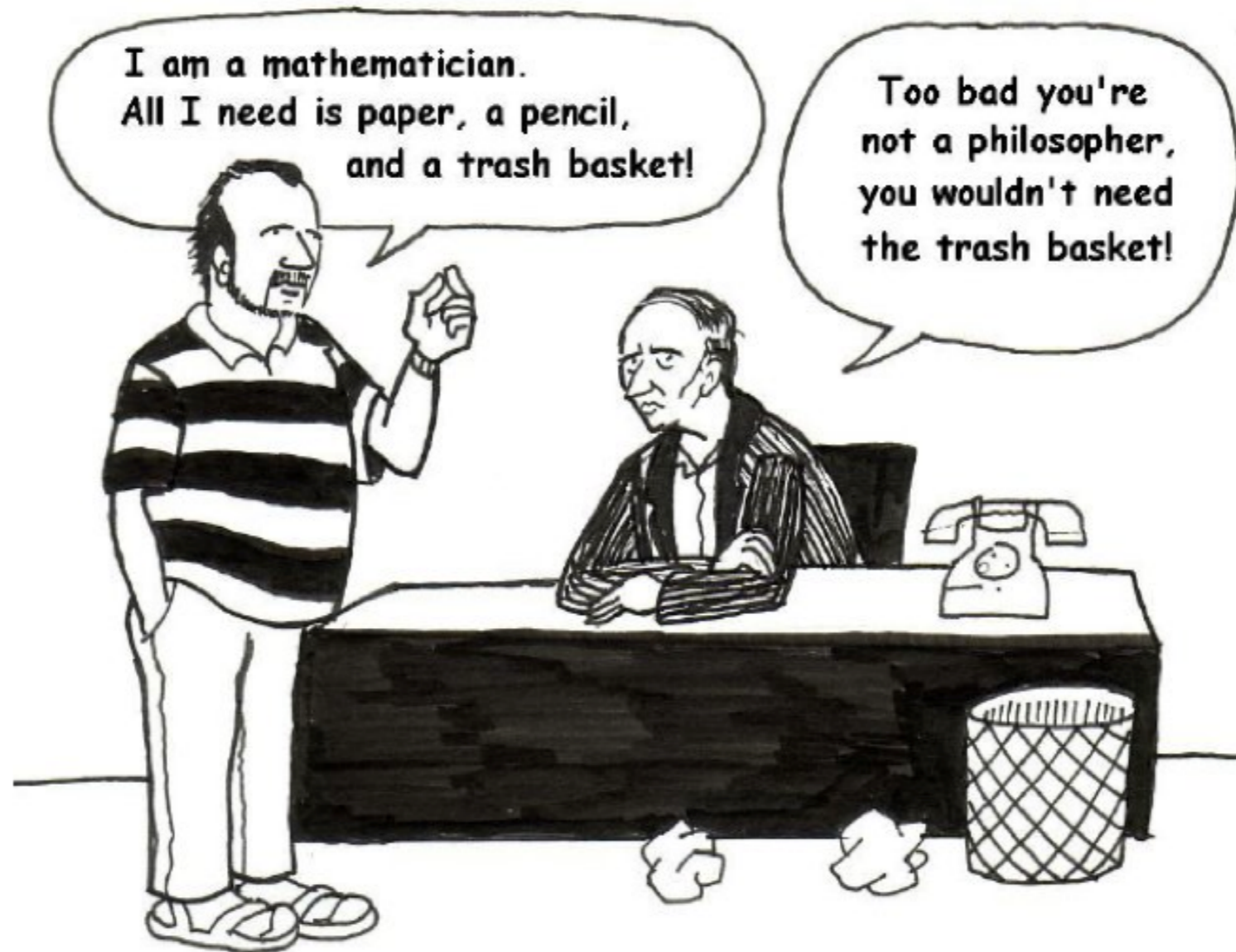
against "Libratus," at Rivers Casino in Pittsburgh,  
on January 11, 2017. ANDREW RUSH/PITTSBURGH POST-GAZETTE/AP

# Elméleti idegtudomány

- Természettudományos szemszögből közelítünk az agyhoz. Olyan elméletet szeretnénk, ami
  - prediktív
  - alapelvekkel magyarázó
  - egységesítő
- Az agy funkcióinak matematikai modelljeit keressük

# Prediktív modellek az idegrendszerben

- modelleket (elméleteket) építünk és megfigyeléseket próbálunk előrejelezni velük
- Computational neuroscience
  - biofizikai mennyiségek predikciója **fiziológiai** kísérletek alapján
- Computational cognitive science
  - viselkedési mennyiségek predikciója **pszichofizikai** kísérletek alapján



– Eugene M. Izhikevich: *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*

“Half of what we are going to teach you is wrong, and half of it is right. Our problem is that we don't know which half is which.”

*Charles Sidney Burwell*

### **Recommended reading**

<http://www.smbc-comics.com/index.php?id=3905>

# Mit szeretnénk prediktálni?

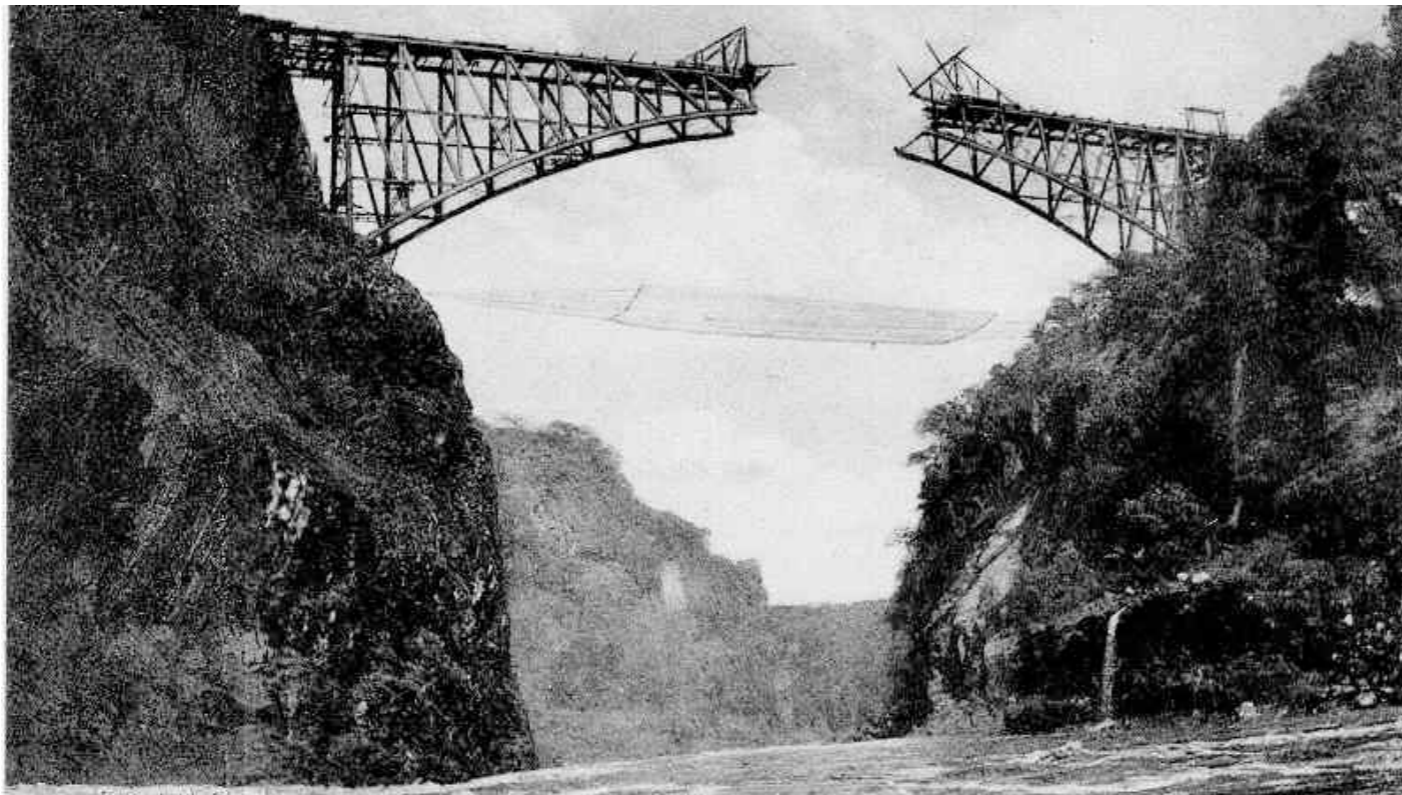
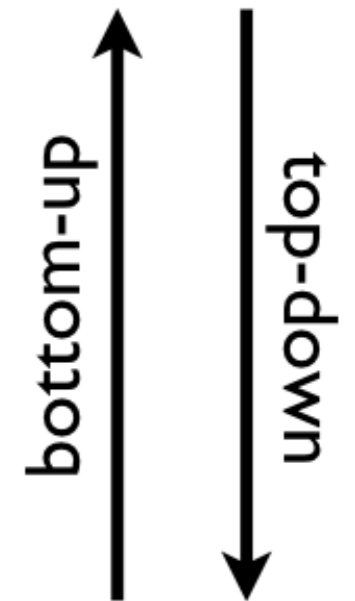
- Azaz az idegrendszer milyen tulajdonságait tartjuk lényegesnek és melyeket elhagyhatónak?
- Minek örülnénk jobban?
  - Egy olyan modellnek, ami jól leírja az agy struktúráját, de keveset mond a viselkedésről
  - Egy olyan modellnek, ami jól reprodukálja a viselkedést, de kevésbé hasonlít az agy struktúrájára

“Prediction is very difficult,  
especially about the future.”  
*Niels Bohr*



# Absztrakciós szintek

- **Komputáció** - a feladat specifikációja, az idegrendszeri funkció leírása bemenet-kimenet leképezésként
- **Algoritmus** - a feladat megoldásának, azaz a leképezés megvalósításának teljes matematikai leírása
- **Implementáció** - az algoritmus fizikai realizációja, idegtudomány esetében idegsejtekkel, az ehhez szükséges struktúrák és dinamikai tulajdonságok leírása



David Marr, 1976

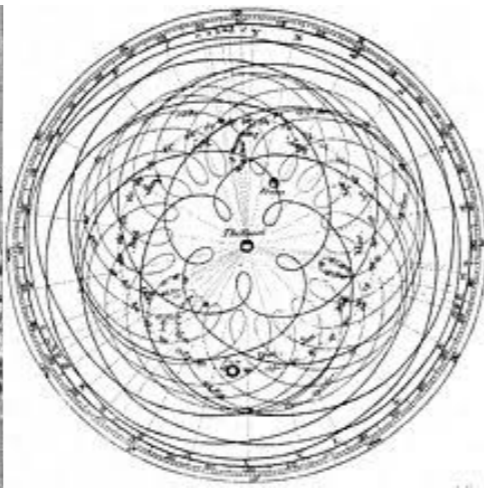
# Normatív modellezés

- Először a leírandó rendszer magasszintű tulajdonságait próbáljuk reprodukálni
  - ezután próbáljuk a strukturális hasonlóságot is kialakítani
  - top-down modellezésnek is hívják
- Ellenkezője a bottom-up
  - a strukturális és dinamikus tulajdonságokat próbálja minél jobban leírni
  - a funkció (viselkedés) emergens tulajdonsága a rendszernek

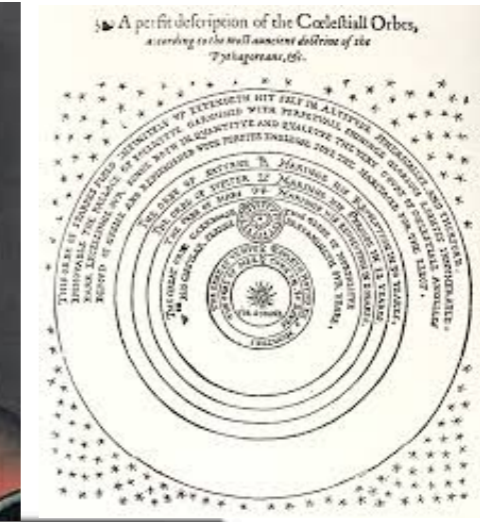
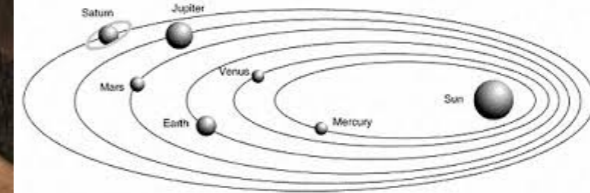
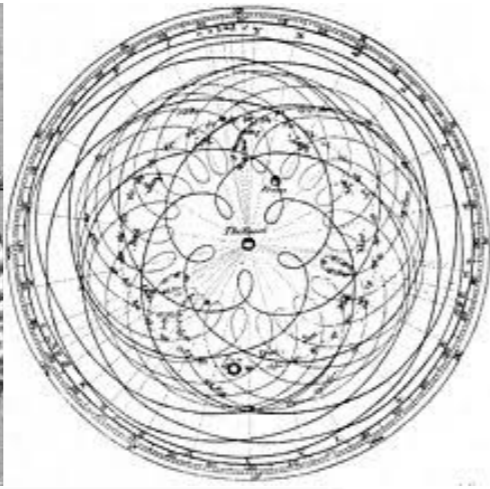
“A wing would be a most mystifying structure if one did not know that birds flew.”

*Horace Barlow*





**prediktív pontosság**

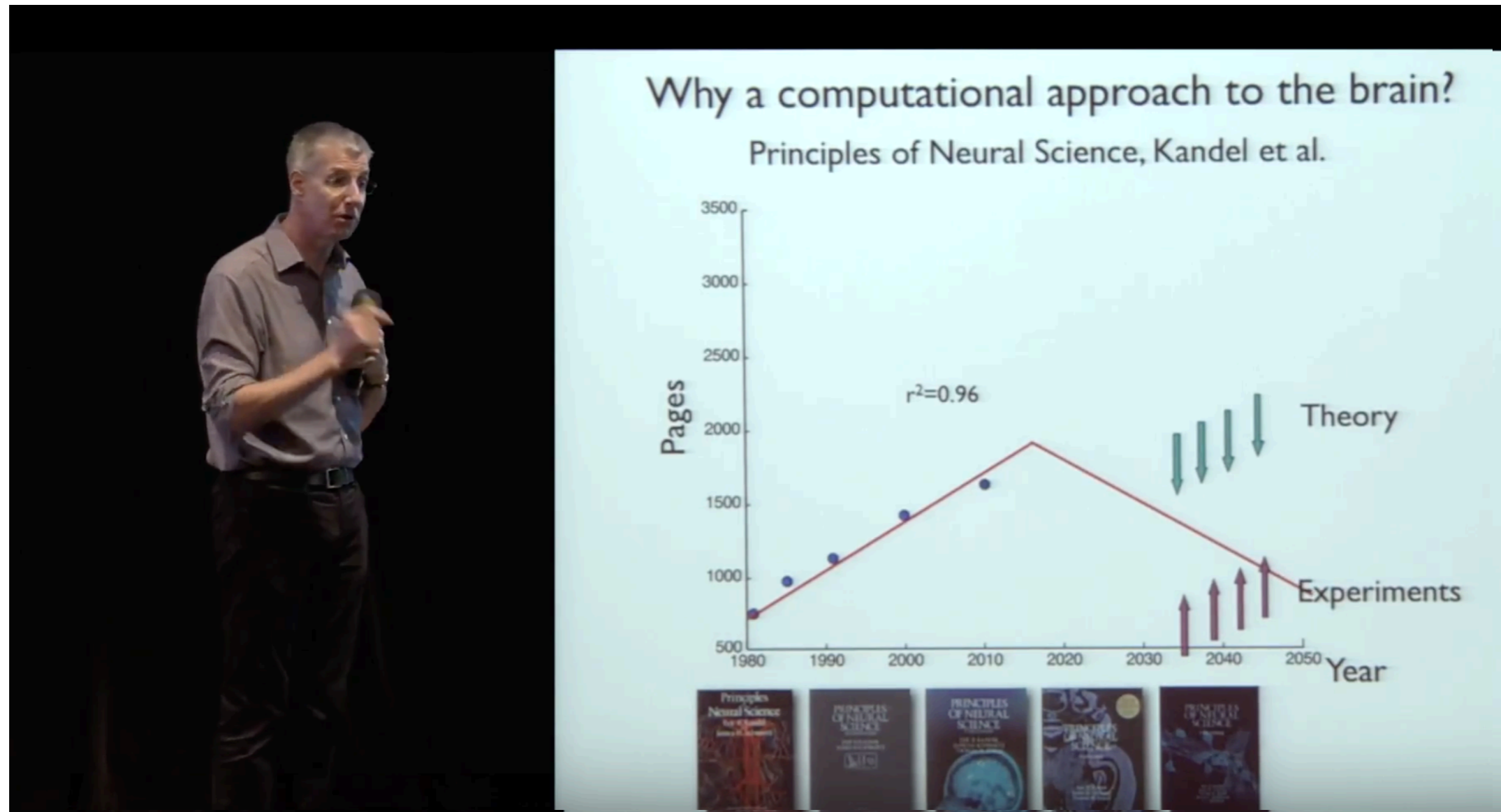


prediktív pontosság

# Egységesítő nézőpontot keresünk

- az alkímia és a fizika közti egyik fő különbség, hogy az egyik speciális, a másik általános
- Az elméleti idegtudomány egyik fő célja, hogy olyan elméletet találjon, ami az agyműködés és a viselkedés különböző aspektusait hasonlóan magyarázza, és alapelvek egy kis halmazára épül föl.
- Egységesítő elméletek más tudományágakból
  - Newton-féle erők a fizikában
  - Evolúciós elv a biológiában
  - Számításelméleti bonyolultság, Turing-teljesség (később még előkerül)

# Az elmélet szerepe az idegtudományban



<https://www.youtube.com/watch?v=wTYHF4LAKQI>

# Miért jó, ha elméleti megfontolások alapján tervezünk kísérletet?

...a jövőbeli stimulusokkal maximalizálja a kölcsönös információt

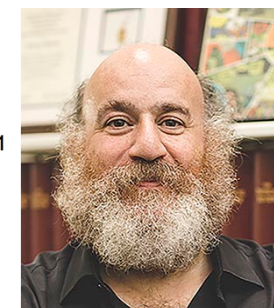
...valószínűségi következtetést valósít meg

## Predictability, Complexity, and Learning

William Bialek, Ilya Nemenman and Naftali Tishby

Posted Online March 13, 2006  
<https://doi.org/10.1162/089976601753195969>  
 © 2001 Massachusetts Institute of Technology

Neural Computation  
 Volume 13 | Issue 11 | November 2001  
 p.2409-2463



## Hierarchical Bayesian inference in the visual cortex

Tai Sing Lee and David Mumford

Journal of the Optical Society of America A

Vol. 20, Issue 7, pp. 1434-1448 (2003)



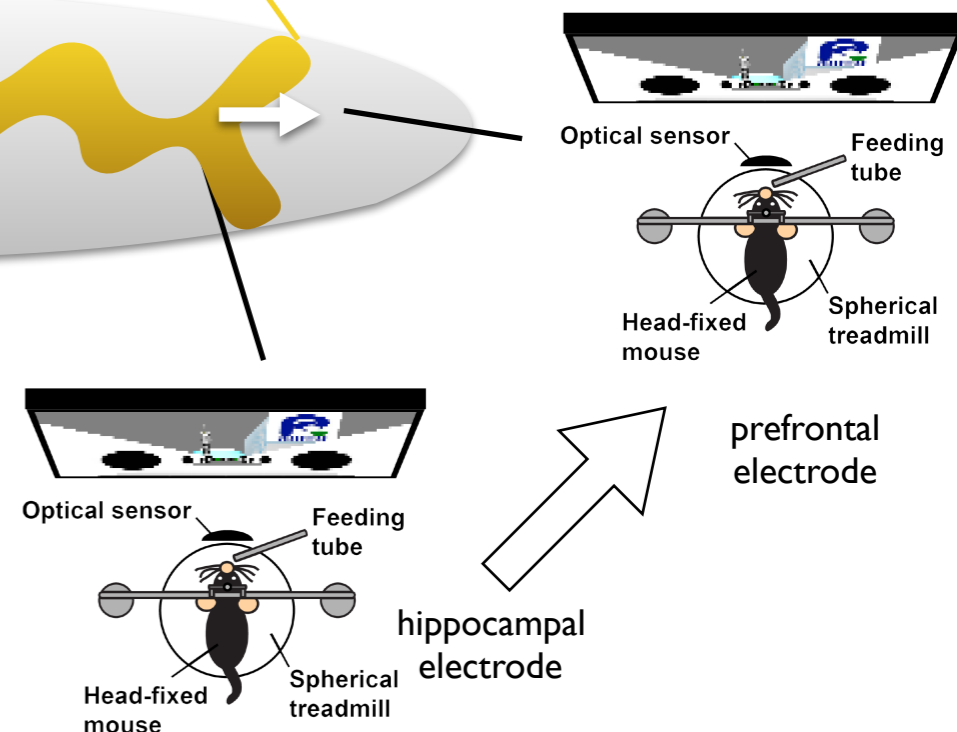
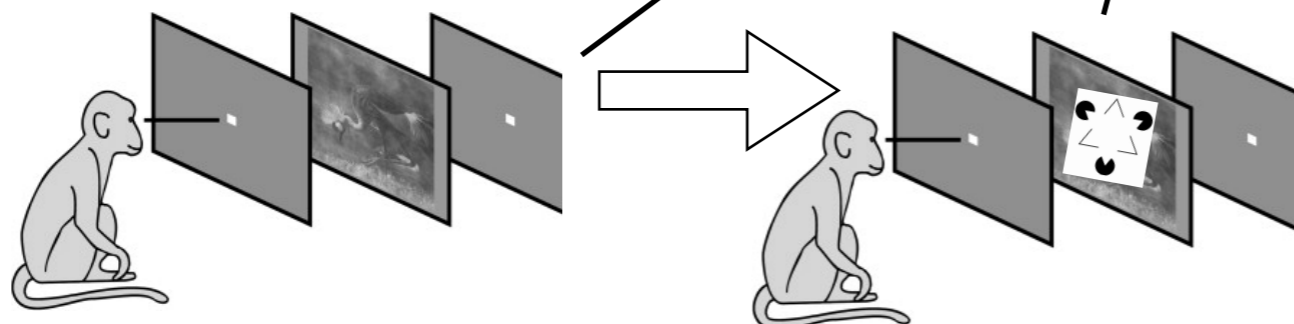
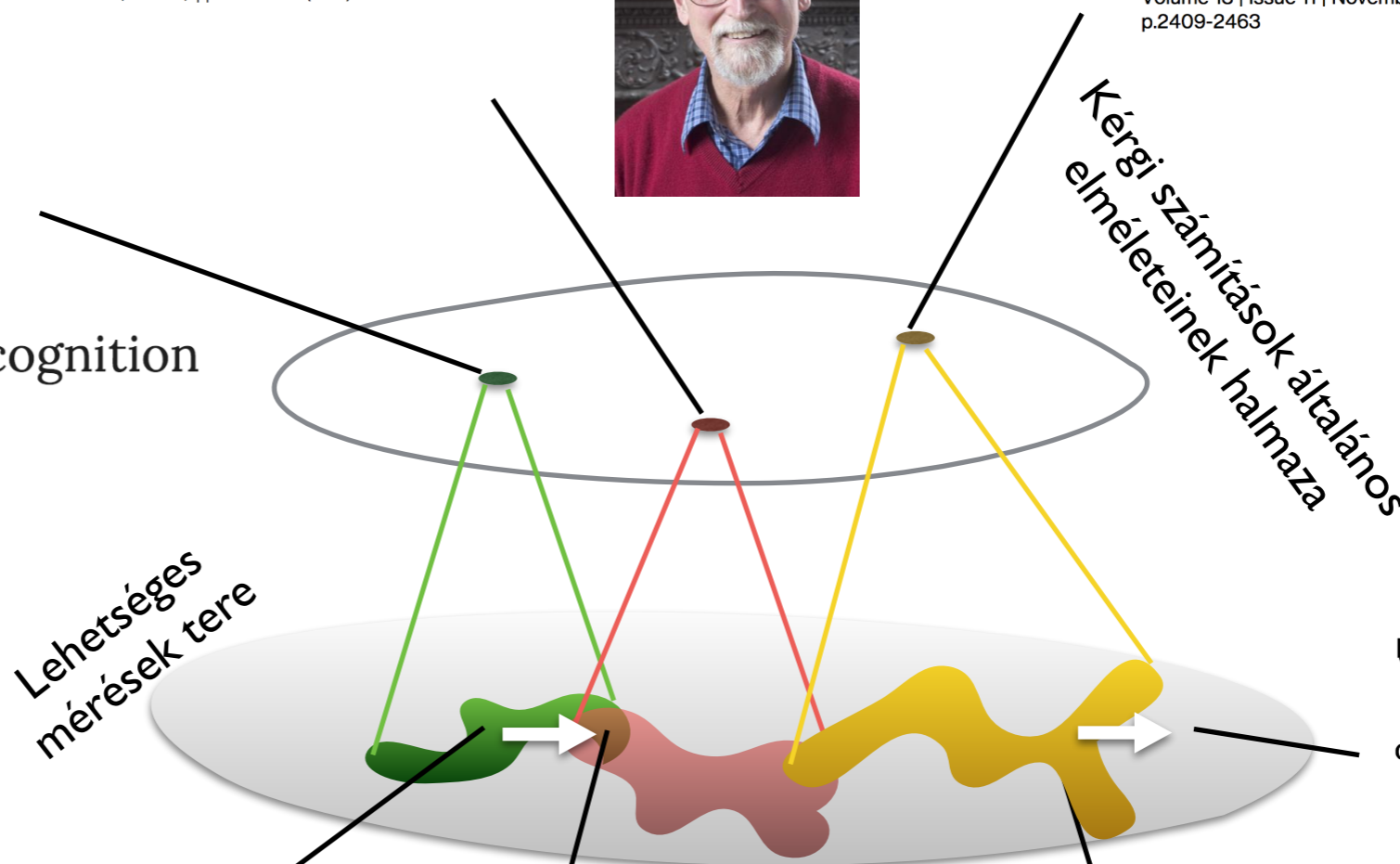
Lehet, hogy az agy...

...előkészíti a bemenetet osztályozás céljaira

## Hierarchical models of object recognition in cortex

Maximilian Riesenhuber & Tomaso Poggio

Nature Neuroscience 2, 1019-1025 (1999)

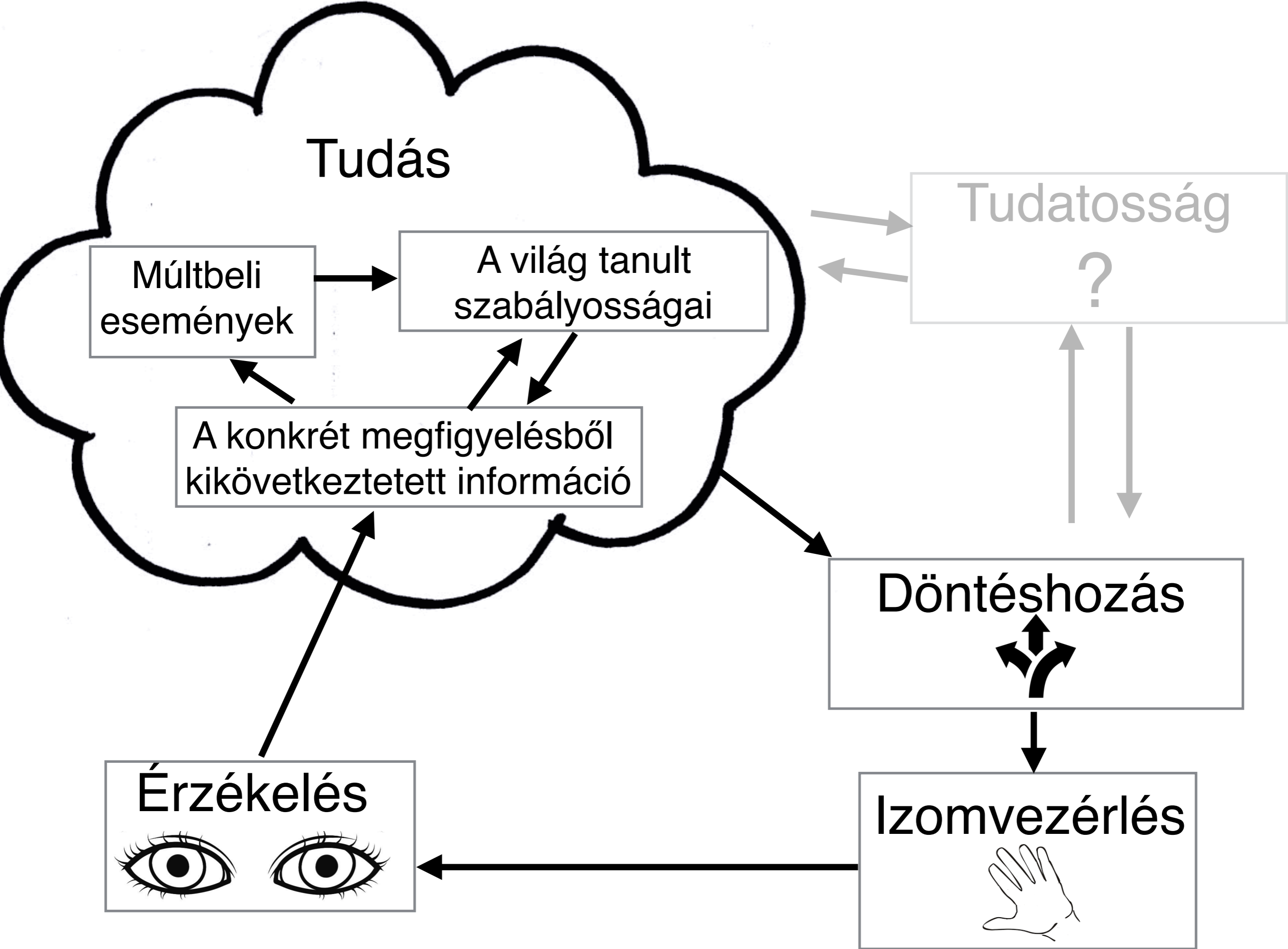


# Mi az agy feladata?

- Izommozgás







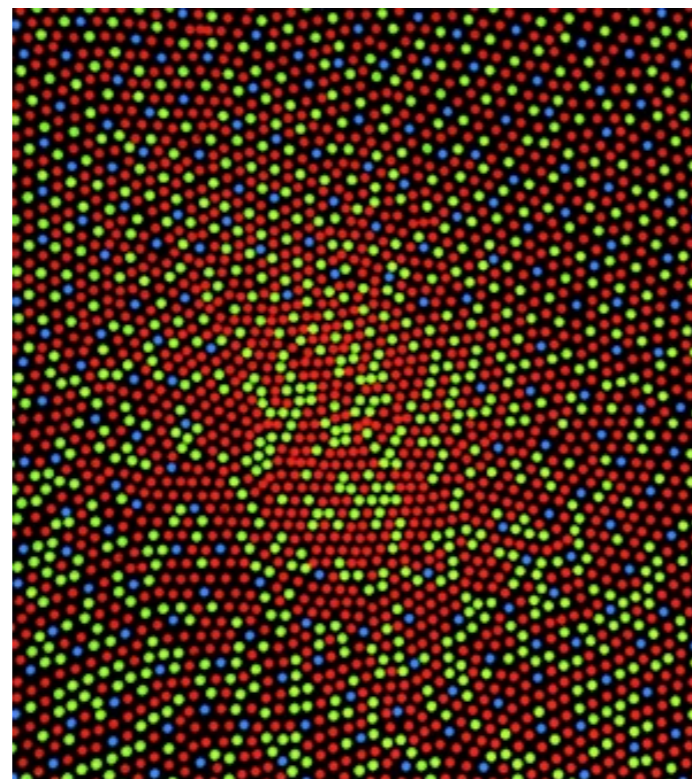
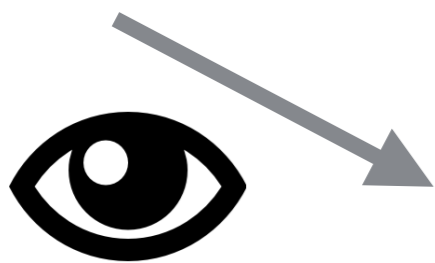
# Mi az agy feladata?

- Izommozgatás
  - ehhez döntéseket kell hozni
  - ez könnyű, ha megelégszünk reflexekkel
  - egyébként emlékeznünk kell dolgokra - meg kell alkotnunk a világtól szerzett tudás **reprezentációját** az idegszövetben
  - e tudás segítségével értelmeznünk kell az érzéleteinket - **következtetés**
  - folyamatosan frissítenünk kell a tudásbázisunkat a beérkező új információval - **tanulás**
- Az agy arra használja a megszerzett tudást, hogy döntések kimenetelét jósolja - modellt épít a világról (tehát mi olyan folyamatokat fogunk modellezni, amik más folyamatokat modelleznek)
  - az idegtudományban használhatunk modelleket arra, hogy adatot elemezzünk, vagy beszélhetünk azokról a modellekről, amiket az agy épít - soha ne keverjük össze a kettőt

# Mi a látórendszer feladata?

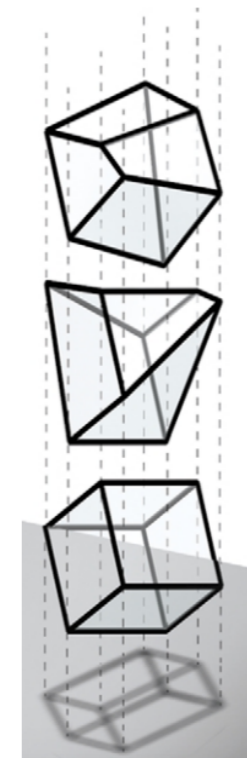
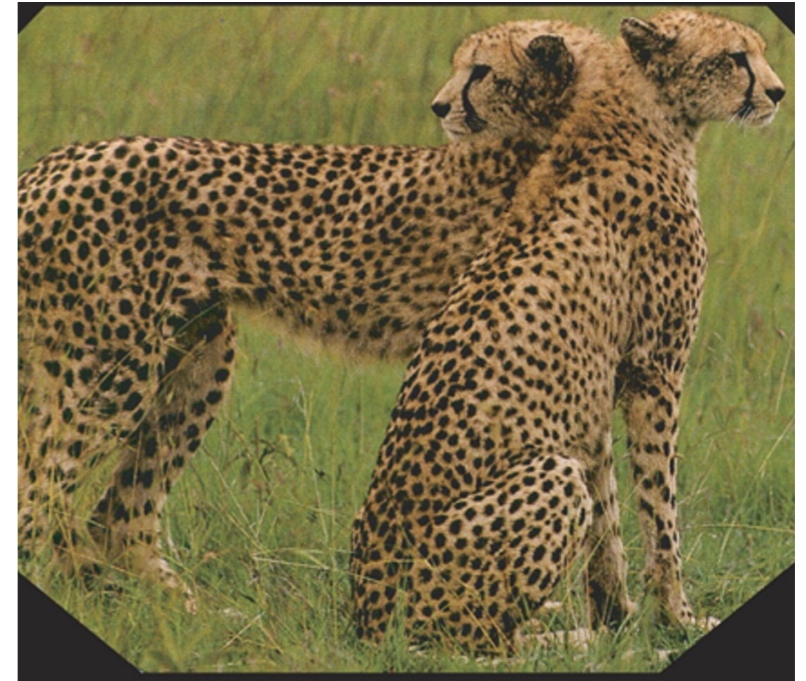


- Hogy az érdektelen adathalmazból (beeső fény hullámhossz-eloszlása) érdekes információt (objektumok) nyerjen ki
- De mik a hasznos objektumok, és honnan tudjuk, hogy hogy lehet felismerni őket?



# A megfigyelések többértelműsége

- A környezet meghatározó tulajdonsága, hogy nem egyértelmű
  - ez a szabály, nem a kivétel
- Az érzékelők (pl. retinális csapok) is zajosak, de a bizonytalanság fő forrása az információhiány
- Emiatt az érzékelés egy következtetési probléma: a megfigyelésekből rekonstruálnunk kell a környezet állapotát



# Percepció mint következtetés

- mik a közvetlenül megfigyelhető mennyiségek az agy számára?
  - a szenzorsejtek aktivációja (csapok és pálcikák, szőrsejtek, ...)
- mik az érdekes mennyiségek?
  - összetett mennyiségek bonyolult kombinációi, pl hogy van-e a környezetünkben egy oroszlán
- generatív modellek írják le, hogy a közvetlenül nem megfigyelt (látens, rejtett) mennyiségek milyen kapcsolatban vannak a megfigyelttel
  - Ha tudjuk a modellt, tudunk mesterséges megfigyeléseket generálni (tudjuk, hogy kell lerajzolni egy oroszlánt)
  - Ebben a modellben kell következtetni a megfigyelt változókból a látensekre (egy kép pixeleiből megmondani, hogy oroszlán-e)

# A világ szabályosságainak tanulása

- Hány kereke van egy autónak?
  - általában csak hármát látunk egyszerre, mégis négyet mondanánk
  - ez tanult információ, ha körüljárjuk, látjuk mind a négyet
    - de ennek felismeréséhez tisztában kell lennünk azzal, hogy végig ugyanazt az autót látjuk - az objektumok perzisztensek az időben (rövidtávon)
    - triviálisnak hangzik, de az újszülöttek nem tudják ezt
  - mondhatnánk, hogy ha csak 3 kereke lenne, akkor instabil lenne
    - ez még több tudást feltételez, pl. adott alakú és felületű tárgyak tipikus súlyeloszlásáról és arról is, hogy hogyan működik a gravitáció

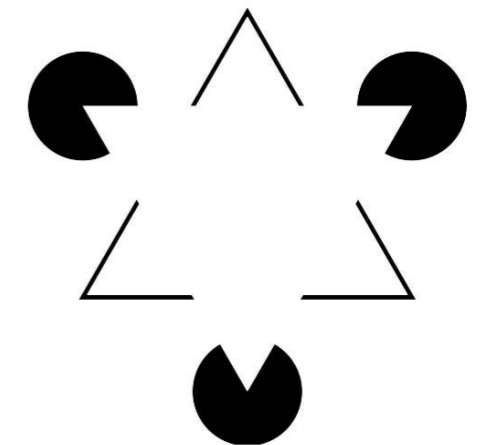


# Mi a tanulás?

- A tanulás a környezet generatív modelljének felépítése megfigyelések alapján
- Meg kell találnunk a megfigyeléseket jellemző szabályosságokat, hogy a modellünk jól tömörítsen
- pl. az objektumok azonosságát sok tulajdonság nem befolyásolja, mint pozíció, látószög, megvilágítás, ...

# A tanult információ és a megfigyelések integrációja

- Az illúziók magyarázhatók azzal, hogy a megfigyeléseket a világ szabályosságairól szerzett tudásunkkal magyarázzuk
- A Gestalt (folytonossági) elvek a formaérzékelés szabályait írják le térben és időben



© 1998 Nature America Inc. • <http://neurosci.nature.com>

## Where is the sun?

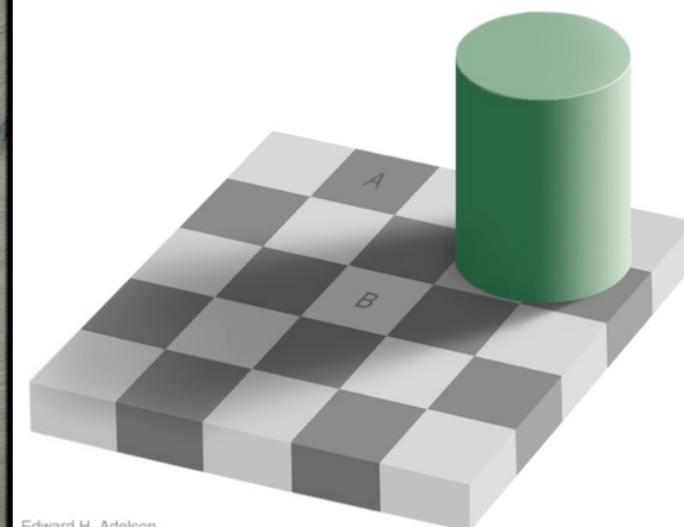
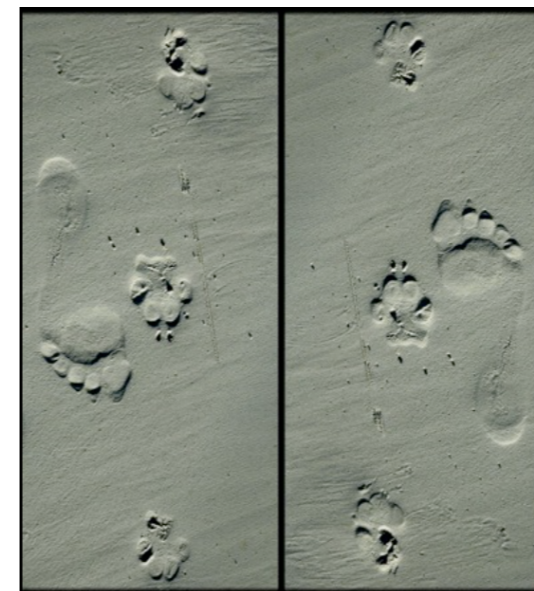
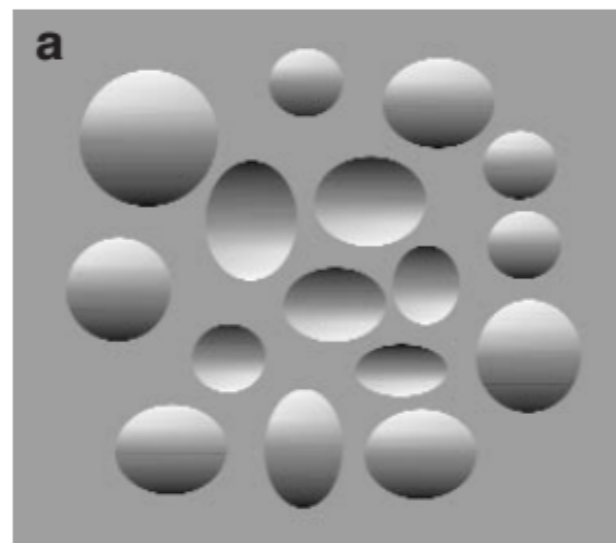
Jennifer Sun<sup>1</sup> and Pietro Perona<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> California Institute of Technology 136-93, Pasadena, California 91125, USA

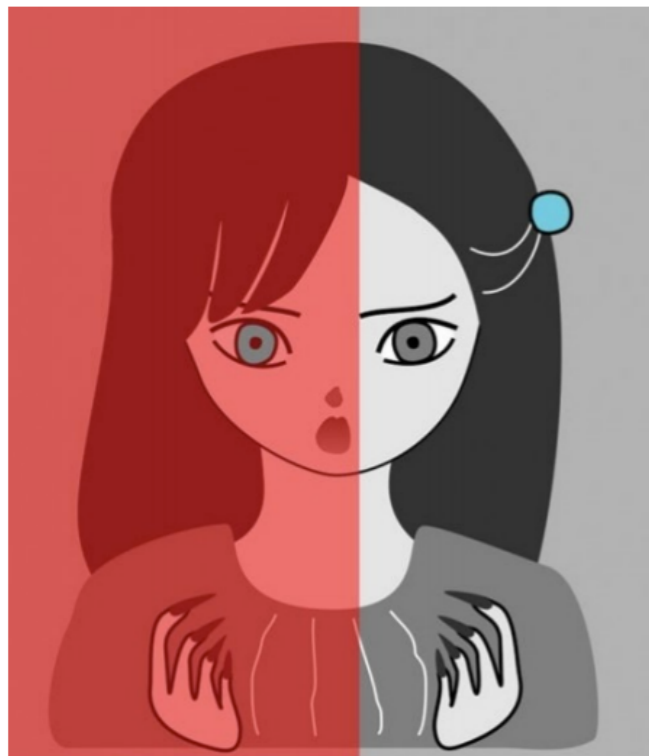
<sup>2</sup> Università di Padova, Via Ognissanti 72, 35131 Padova, Italy

Correspondence should be addressed to P.P. ([perona@vision.caltech.edu](mailto:perona@vision.caltech.edu))

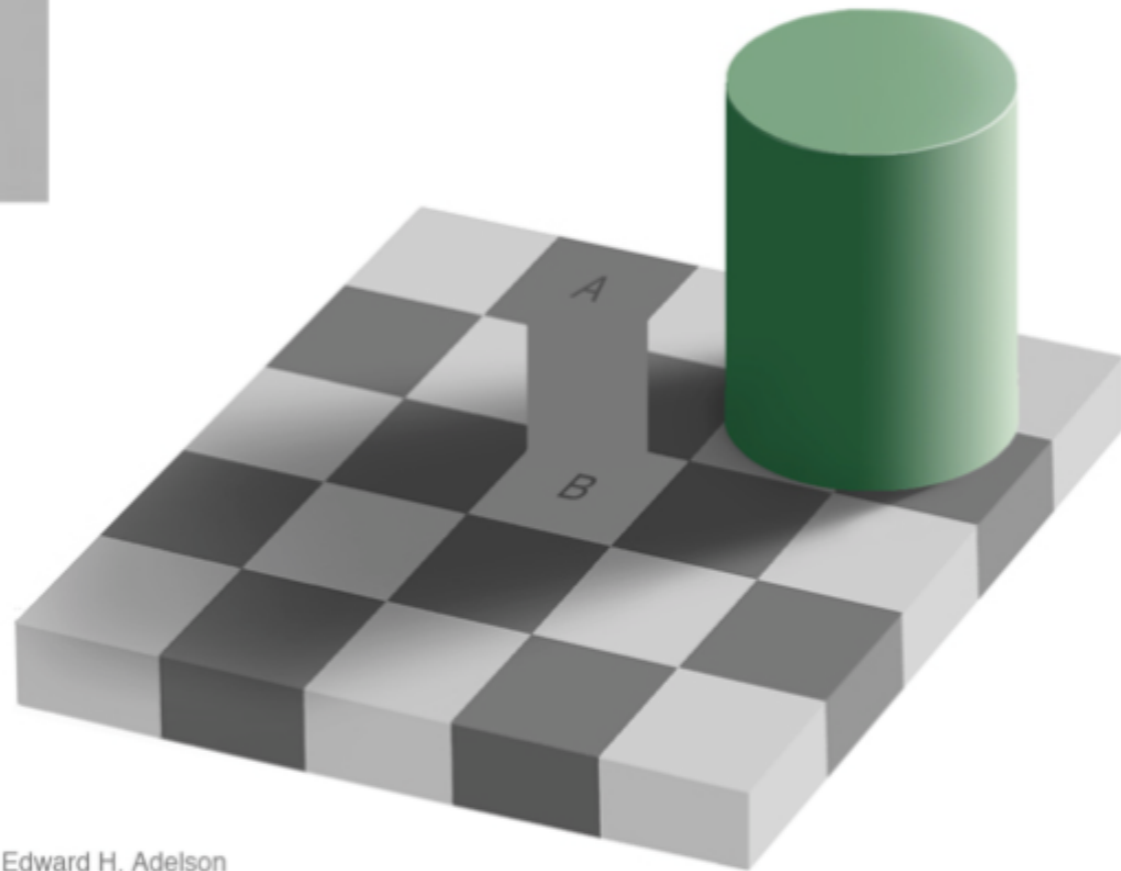
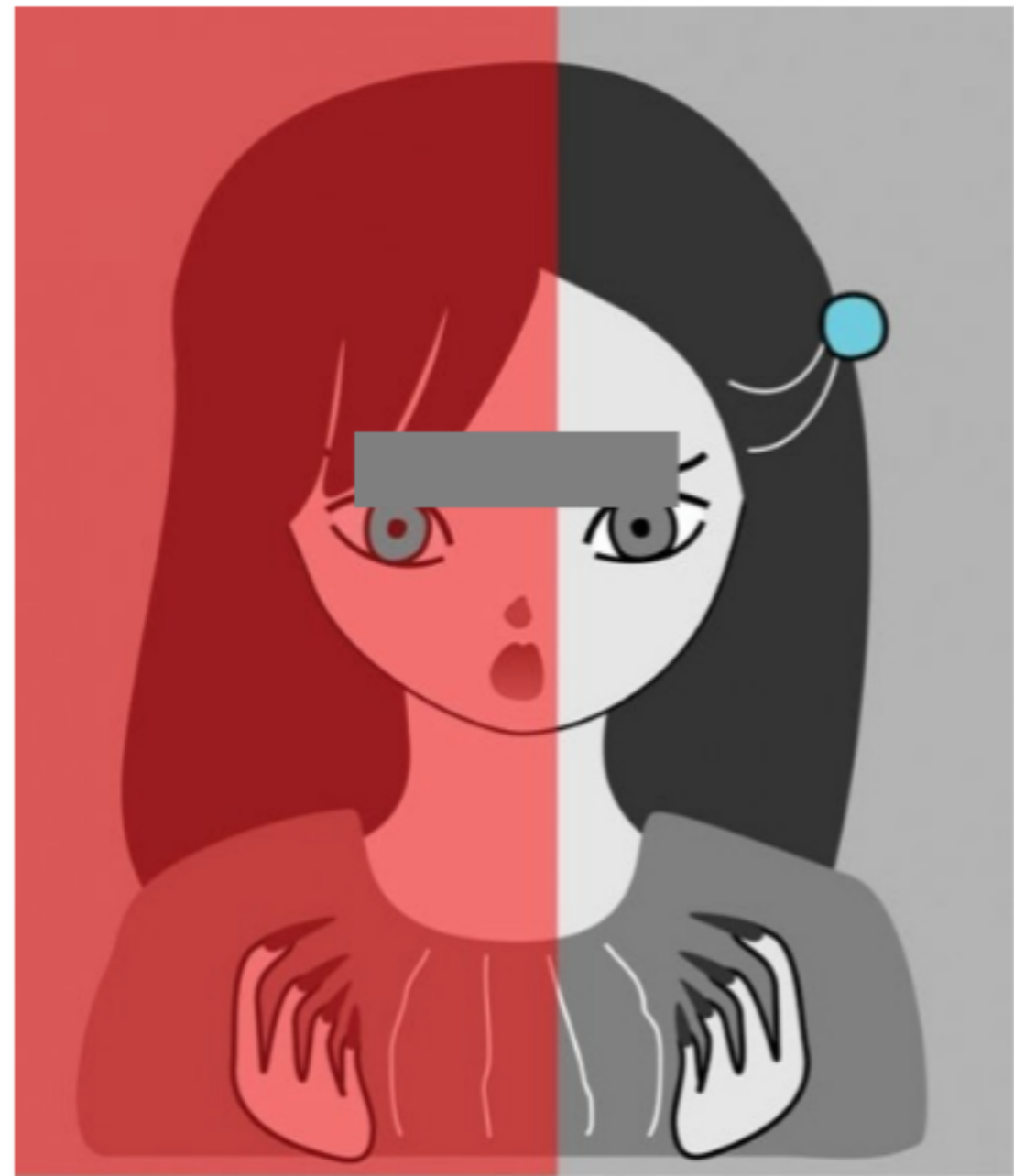
nature neuroscience • volume 1 no 3 • july 1998



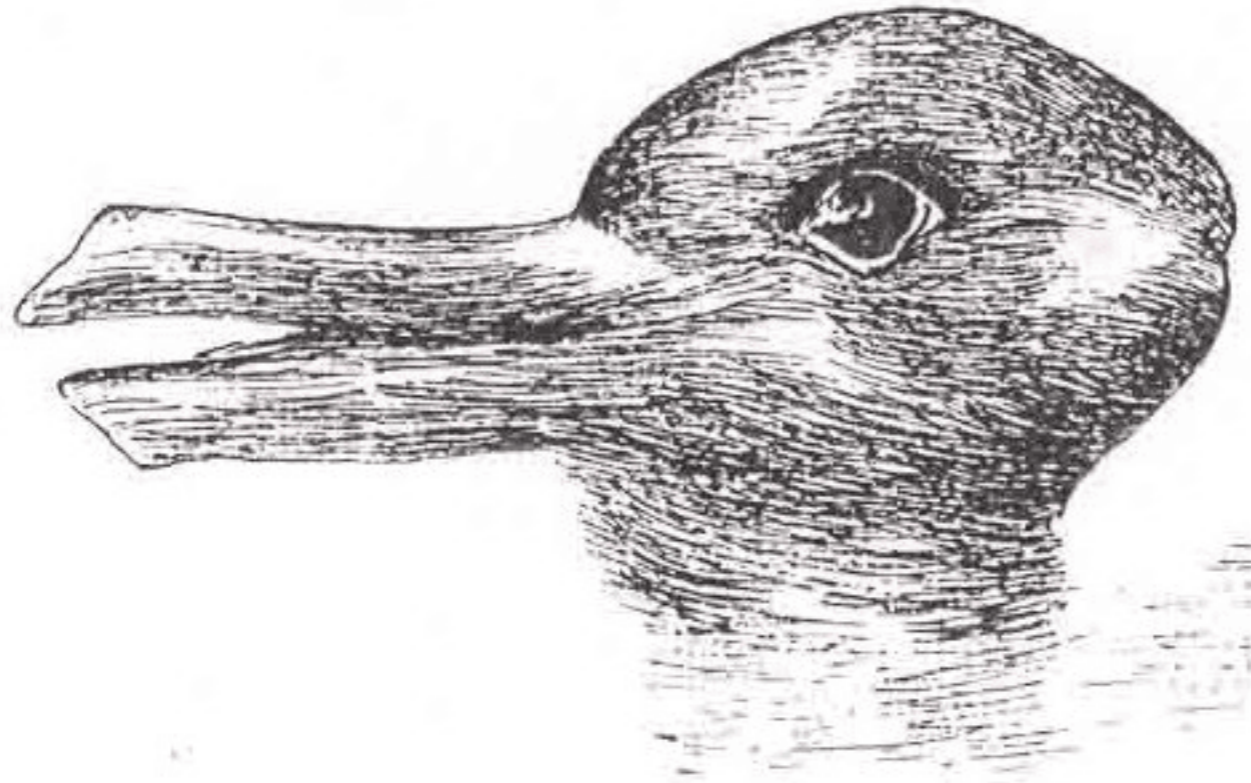
Edward H. Adelson







Edward H. Adelson



Percept Mot Skills. 1993 Apr;76(2):577-8.

## **The Easter bunny in October: is it disguised as a duck?**

Brugger P<sup>1</sup>, Brugger S.

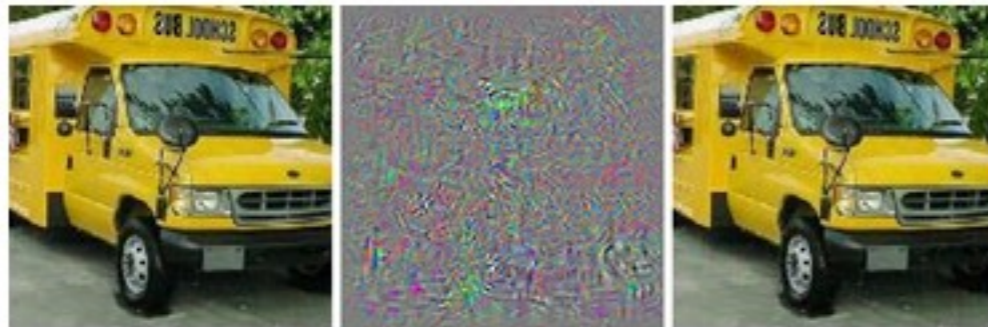
### **+ Author information**

### **Abstract**

To study the influence of motivational expectancy on perception, the ambiguous drawing of a duck/rabbit was shown to 265 subjects on Easter and to 276 subjects in October. The ambiguous drawing, though perceived as a bird by a majority of subjects in October, was most frequently named a bunny on Easter. This biasing effect of expectancy upon perception was observed for young children (2 to 10 years) as well as for older subjects (11 to 93 years).

PMID: 8483671 [PubMed - indexed for MEDLINE]

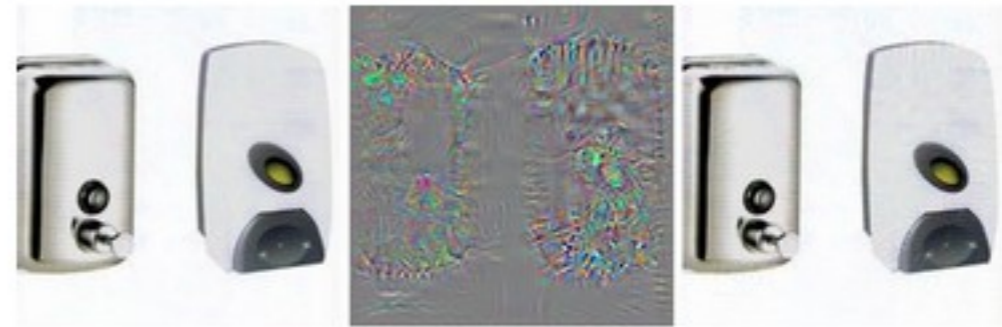
# Illúziók mesterséges neuronhálókbán



correct

+distort

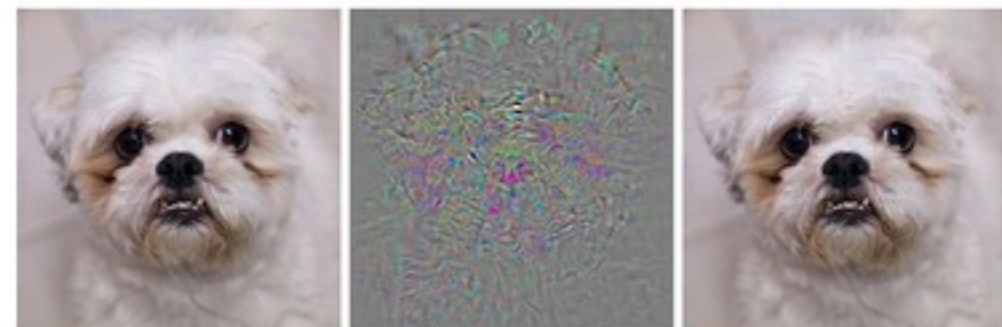
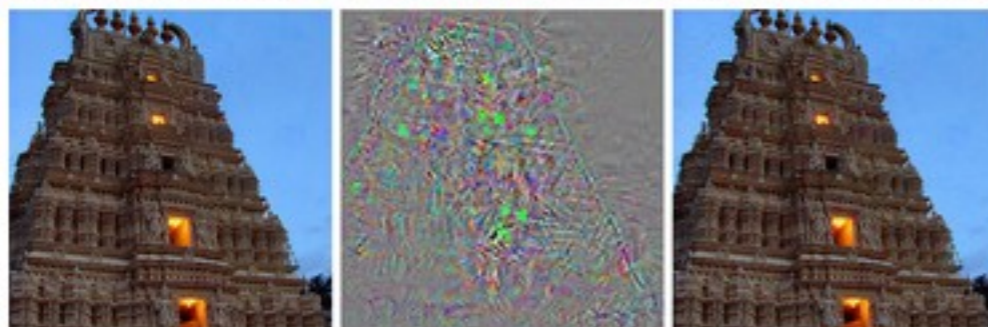
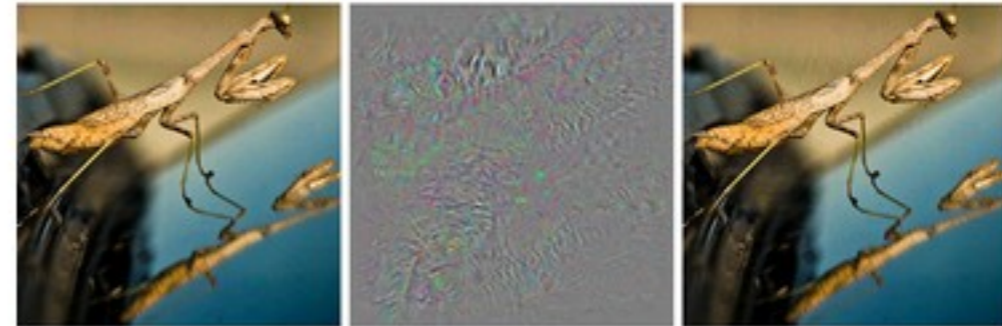
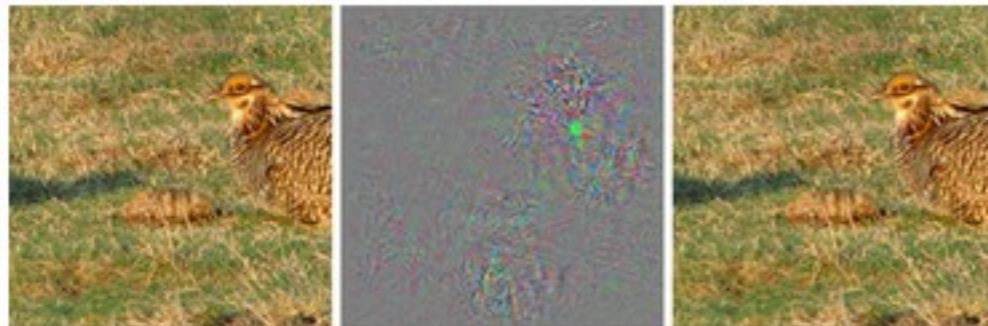
ostrich



correct

+distort

ostrich



# A reprezentáció kérdései

- Mik azok a környezetet leíró mennyiségek, amelyekre az embereknek (és állatoknak) szükségük van a döntéseik meghozatalához?
  - ezek nem feltétlenül ugyanazok, mint amiket ténylegesen kiválasztanak, de remélhetőleg van kapcsolat
- Mik azok a köztes mennyiségek ezek és a megfigyelések között amelyek hasznosak a számítás során?
- Ha erre a két kérdésre tudjuk a választ, az megadja a mentális modell struktúráját - általában egyszerre ennek csak egy kis részét vizsgáljuk
- Milyen algoritmusok számítják ki ezeket a mennyiségeket?
- Létezik feladatfüggetlen mentális világmodell, vagy az agy különböző feladatokhoz különböző modelleket használ, amiket a kontextus alapján váltogat?
- Hogyan tudunk történeteket kitalálni - azaz hogyan használjuk a mentális modellt arra, hogy akár a tudásunkkal ellentmondó hipotéziseket fogalmazzunk meg és vizsgáljuk (mi lenne, ha...)?

# Mi a jó reprezentáció?

- A környezetet leíró változók leképezése az agy mint formális rendszer által megvalósított világmodell változóira
- A jó reprezentáció tömöríti a megfigyeléseket
  - nem emlékezhetünk minden szituáció minden részletére egész életünkben - egyszer megharapott egy fekete kutya, egyszer meg egy barna
  - túl nagy mennyiségű adat lenne
  - nem tudnánk általánosítani az ismereteinket új megfigyelésekre - nem tudnám, mi lesz, ha jön egy fehér kutya

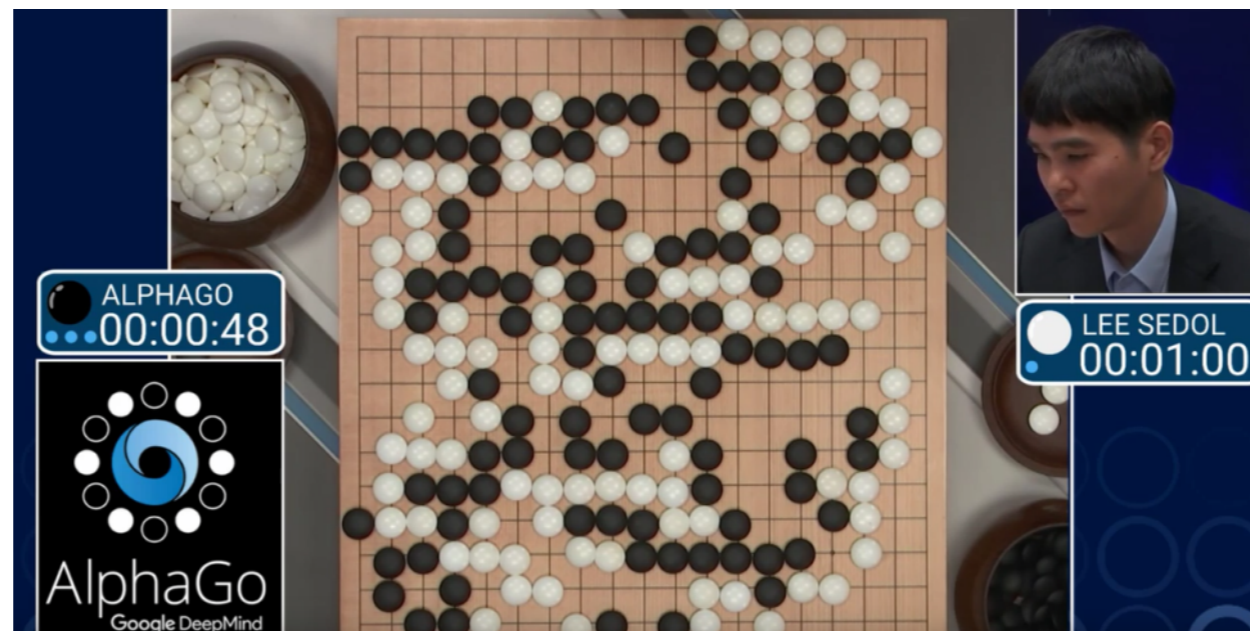
# A neurális kód

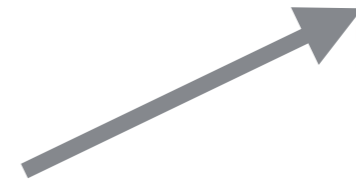
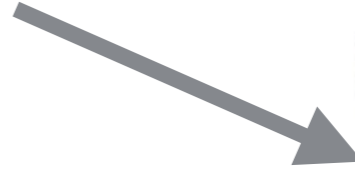
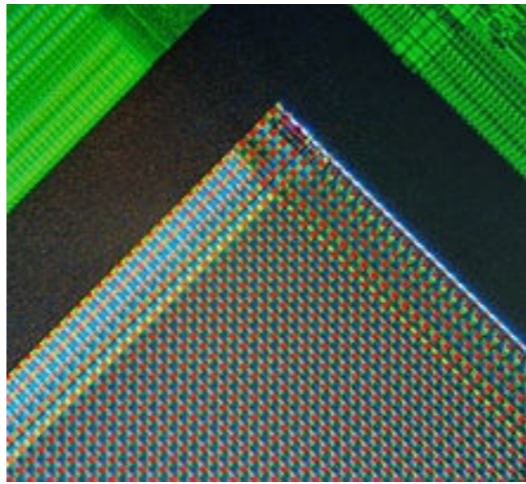
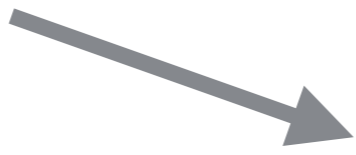
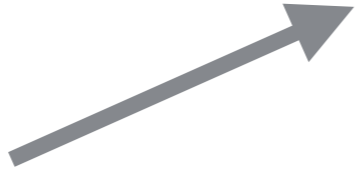
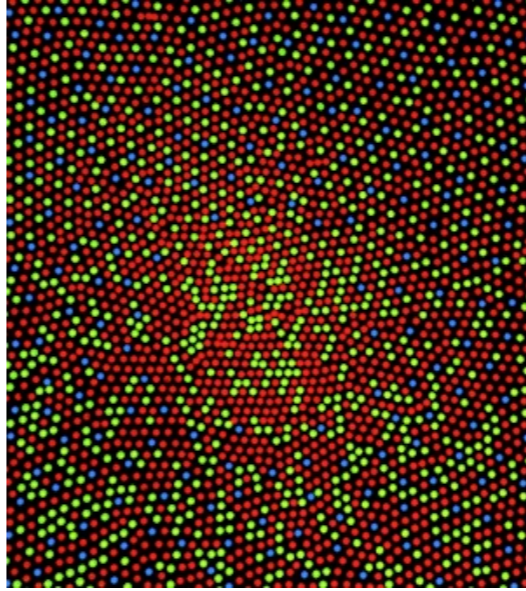


- Hogyan kapcsolható a mentális modell reprezentációja biofizikai mennyiségekhez?
- Mindenképpen szükségünk van erre?
  - Ha rendelkeznénk a mentális modell és a hozzátartozó algoritmusok teljes leírásával, és kizárólag viselkedéstakarunk prediktálni, akkor nem
  - a gyakorlatban ezzel nem rendelkezünk, és segít a körülhatárolásában, ha biológiai szempontú megszorításokat vehetünk figyelembe
  - természetesen orvosi alkalmazásokhoz szükségesek a neurális szintű leírások

# Agy-számítógép párhuzam

- Próbálhatunk úgy gondolni az agyra, mint egy digitális számítógépre
  - a hardver a szövet, a szoftver a viselkedés
- Manapság sok szoftver ahhoz hasonló feladatokat old meg, mint amiket az emberi agy is
  - objektumok felismerése képeken
  - objektumkategóriák, absztrakt koncepciók tanulása
  - beszéd(nyelv-)felismerés és -szintézis
- Az analógia nem tökéletes, de sokat segít abban, hogy meghatározzuk azt az absztrakciós szintet, amin fel akarjuk tenni a kérdéseinket







# Agy-számítógép párhuzam

Az elméleti idegtudományban ahhoz hasonló problémával nézünk szembe, mintha ki kellene találnunk, hogy hogy működik egy webböngésző a CPU száz tranzisztorából mért feszültséggörbék alapján.



[Browse](#)

[Publish](#)

 OPEN ACCESS  PEER-REVIEWED

RESEARCH ARTICLE

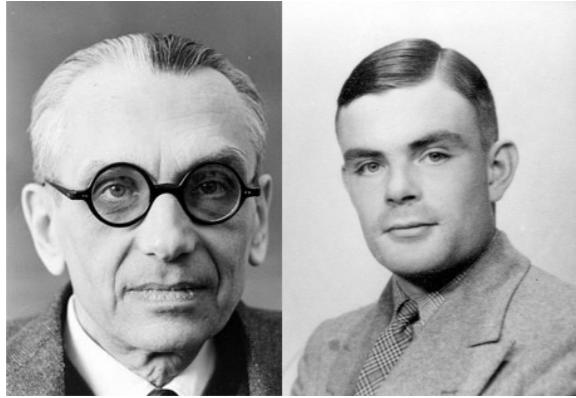
## Could a Neuroscientist Understand a Microprocessor?

Eric Jonas , Konrad Paul Kording

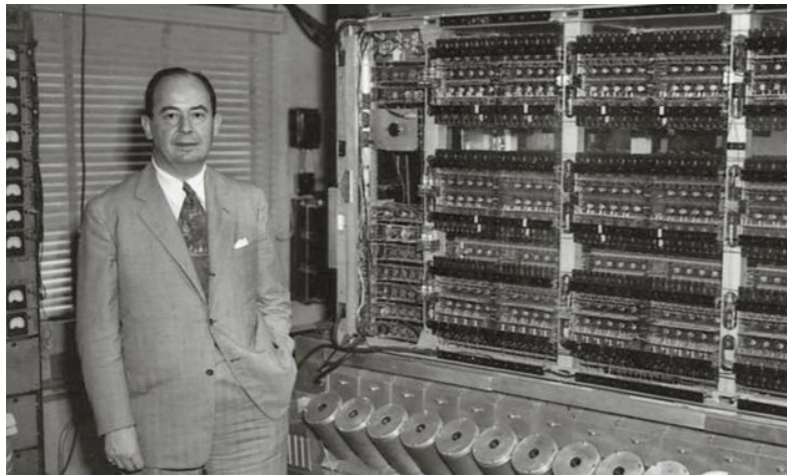
Published: January 12, 2017 • <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005268>

# A kezdetek

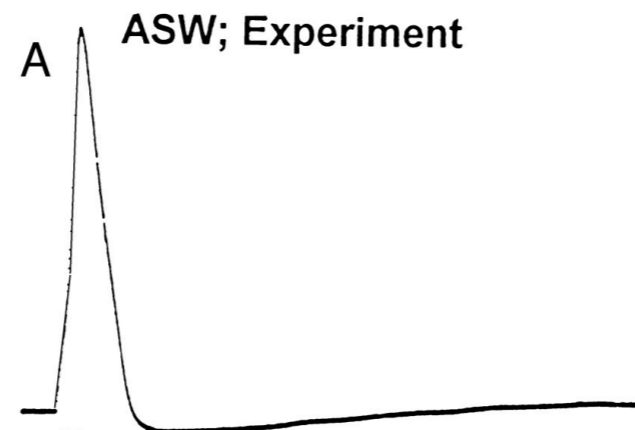
logikai eredmények



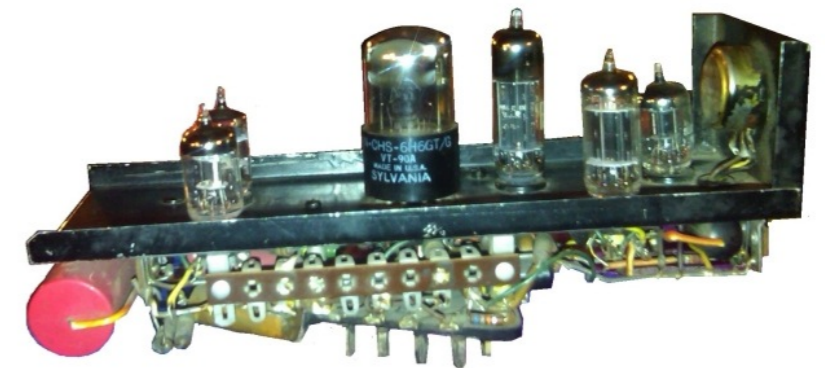
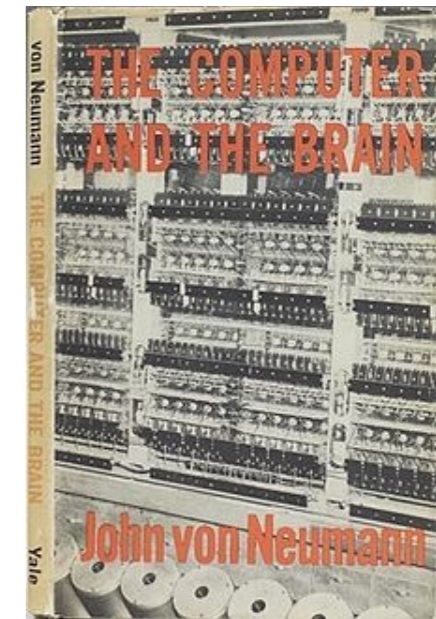
digitális számítógép



idegrendszeri mérések



kibernetika



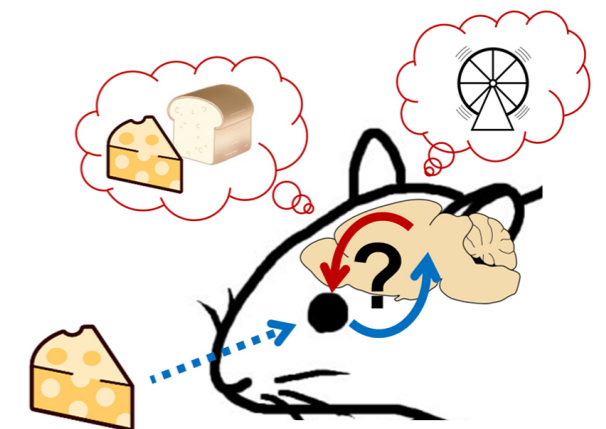
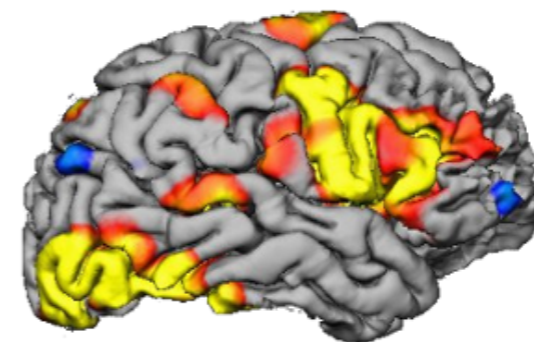
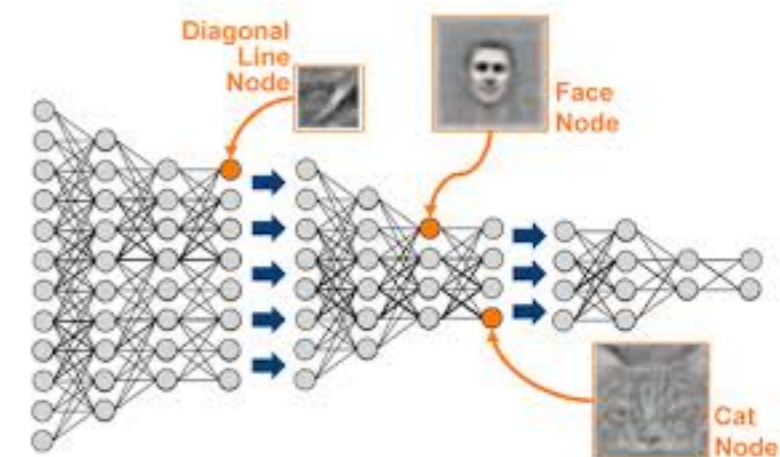
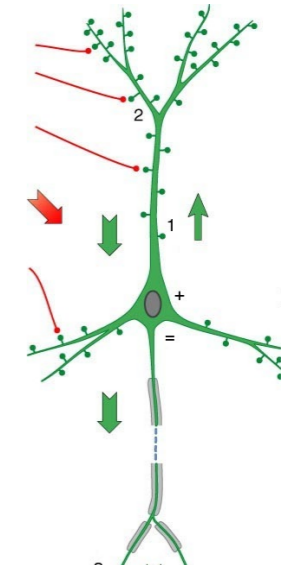
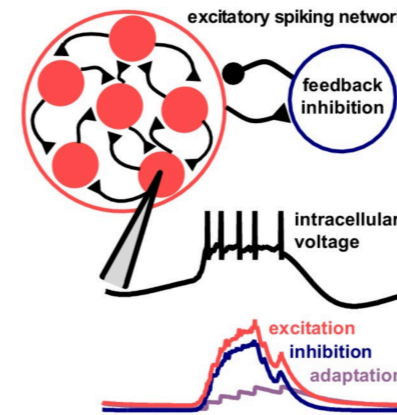
mesterséges idegsejt

# Mesterséges intelligencia és idegtudomány

- Közös gyökerek a kibernetikai társaságban
  - Warren McCulloch, Walter Pitts, Norbert Wiener és Neumann János
  - Logikai számítások idegsejtszerű elemekből
- Minden problémának az egyik területen van egy párhuzamos problémája a másikon
  - MI: hogy lehet legjobban megcsinálni?
  - IT: hogyan csinálják az élőlények?
- Kölcsönös inspirációt nyújtanak egymásnak, például
  - IT -> MI: neurális hálózatokra épülő módszerek a gépi tanulásban
  - MI -> IT: valószínűségi modellek megfigyelésekre illesztése mint idegrendszeri modell

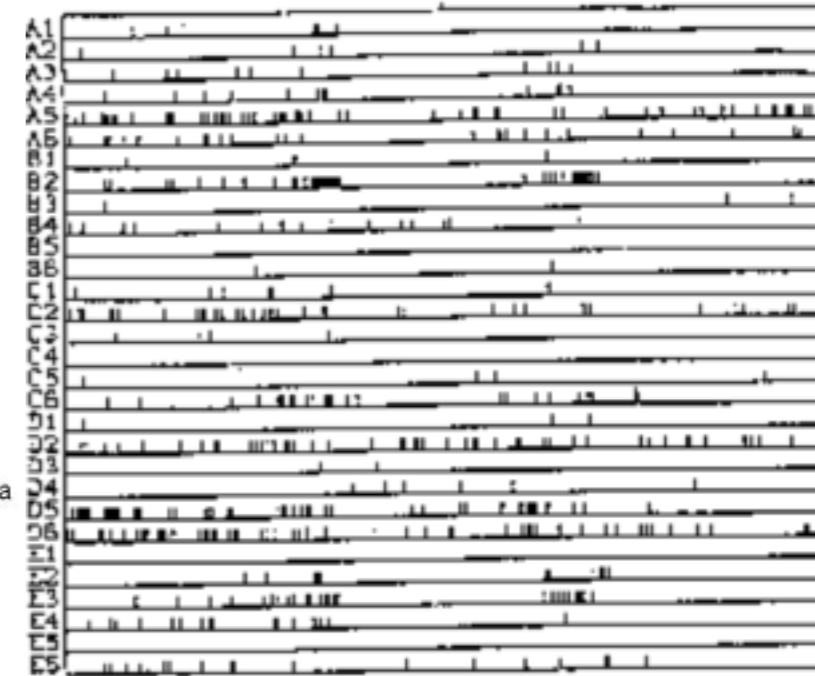
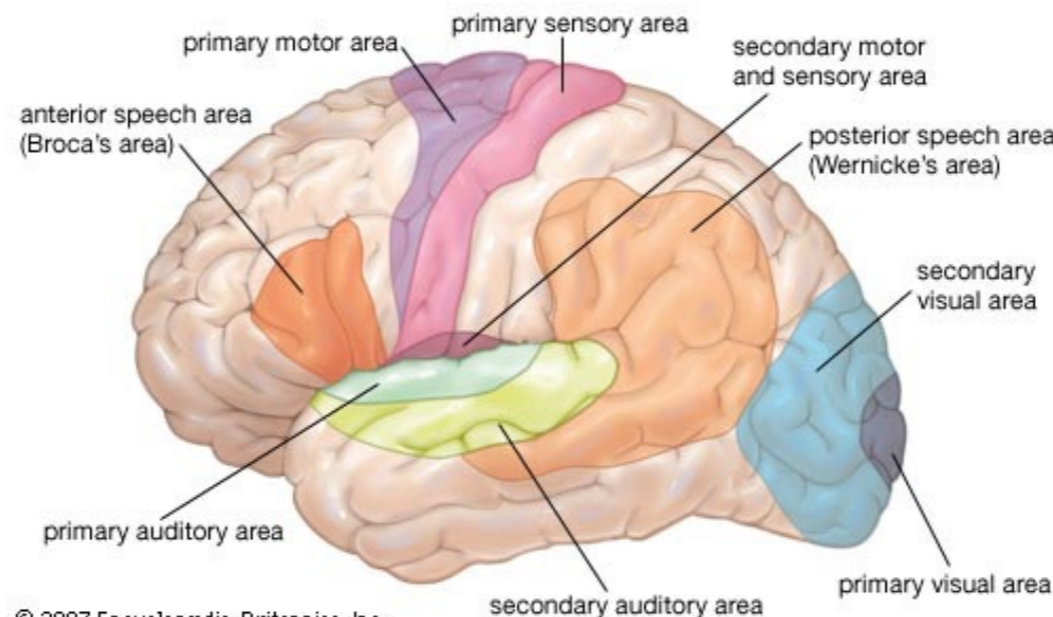
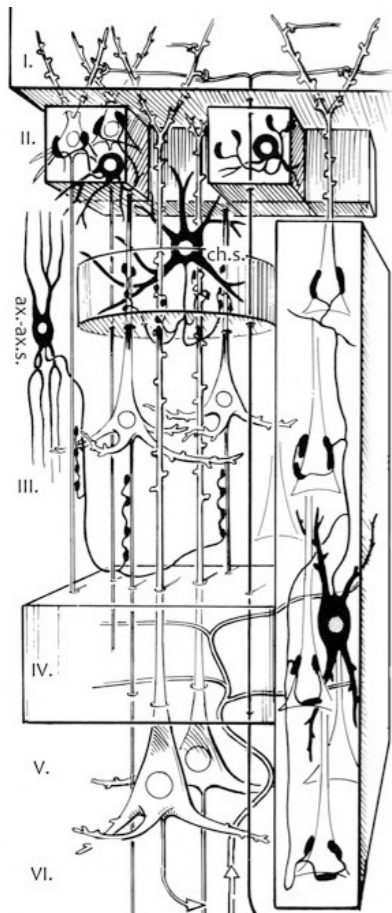
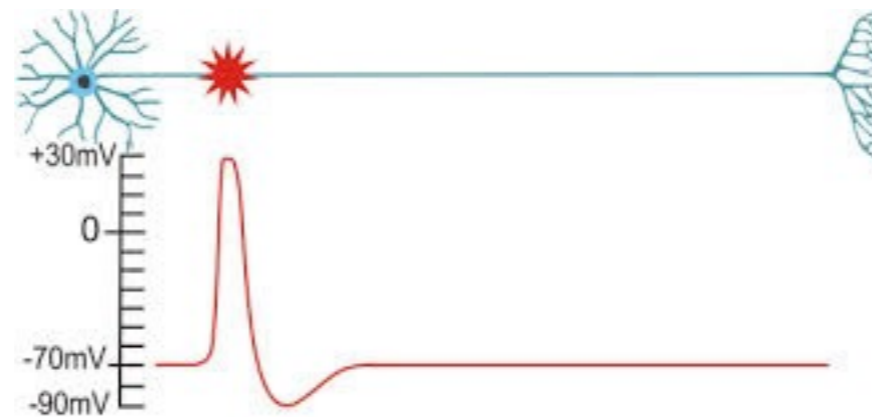
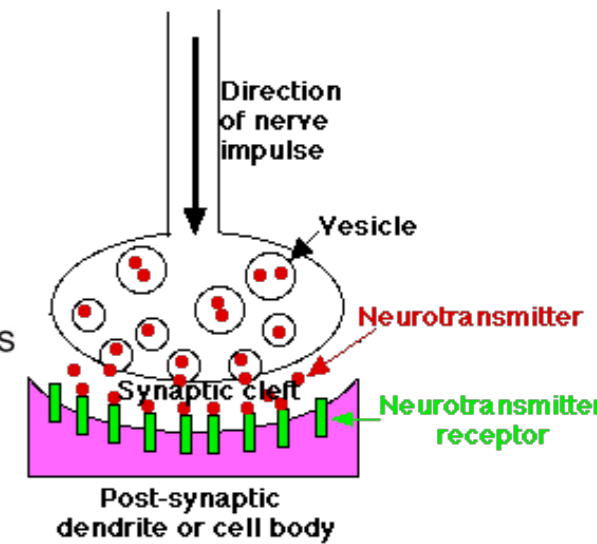
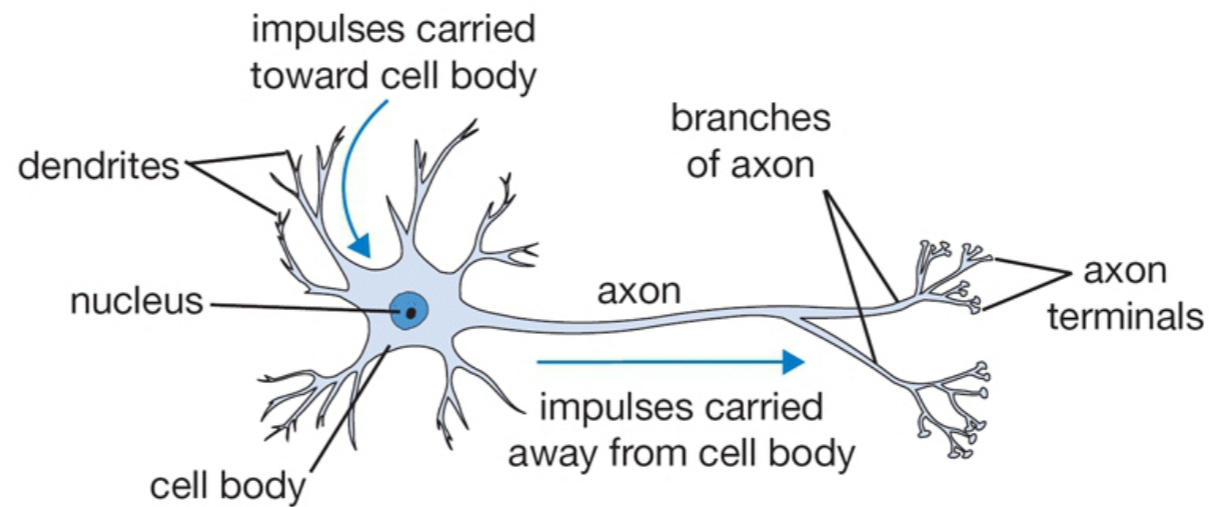
# Az elméleti idegtudomány irányjai

- Biofizikai részletességű modellezés
- Spiking hálózatok
  - Kiegyensúlyozott E/I hálózatok
- Konnekcionista hálózatok
  - Deep learning
- Systems neuroscience
- Kognitív idegtudomány



# Hogyan épül föl az agy?

- Idegsejtek és szinpasziszok
- membránpotenciál és akciós potenciálok
- Funkcionálisan specializált agyterületek
- Canonical microcircuit?

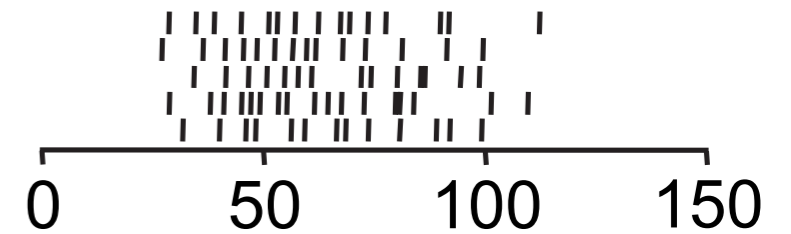


# Mi az, amit mérni lehet?

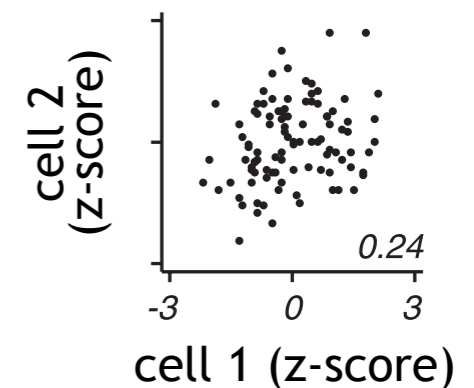
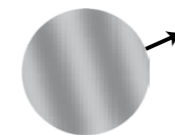
- Szeretnénk megmérni, hogy egy macska vizuális kérgében a neuronok membránpotenciálja hogy alakul egy adott kép nézése során. Mik lesznek a nehézségek?
- Sok sejtet nem tudunk megszúrni külön elektródával, extracelluláris elektróda kell, vagy calcium imaging
  - Csak akciós potenciálokat láthatunk, membránpotenciált nem
  - Ha elektródát használunk, hogyan állapíthatjuk meg, hogy melyik neuronhoz tartoznak a kontaktpontokon mért akciós potenciálok?
- Hogy vesszük rá a macskát, hogy nézze a képet?
  - Rögzíteni kell - nem túl természetes környezet.
  - Rögzítve sem néz oda - lehet altatni, de akkor belőtt macska látását vizsgáljuk

# Neurális válaszvariabilitás

- A receptív mezőn túl
- A neuronok ugyanazon stimulusra adott válasza variabilitást mutat
- Több neuron válaszáinak korrelációja is változik
- Probabilisztikus modellekkel ezt a variabilitást a környezetet leíró mennyiségek feletti valószínűségi eloszlások reprezentációjához köthetjük



*Gur & Snodderly, Cereb Cortex 2006*



*Kohn & Smith, J Neurosci 2005*

# Az előttünk álló problémák

- Áttekintettük, hogy különböző funkciók mely területeken lokalizálódnak az agyban
- Próbáljuk meg körülhatárolni, hogy milyen számításokat implementálnak
- A kurzus nagy részén érzékeléssel kapcsolatos funkciókról lesz szó
  - ez nagyon jelentős része az agyi funkcióknak: minden, ami az érzékszervi bemeneteket tudásra képezi le, beleértve a jelfeldolgozást, memóriaformációt, tanulást, nyelvi feldolgozást, stb.
  - néhány órán lesz szó döntéshozásról is
  - a normatív modellezés szellemében most arra van szükségünk, hogy matematikai eszközökkel definiálni tudjuk a környezetről szerzett (bizonytalan) tudást és az ezt létrehozó algoritmusokat
- amint a rendelkezésünkre áll egy jól használható keretrendszer ehhez, két dolgot fogunk tenni vele
  - ellenőrizzük, hogy jól prediktálja-e emberek és állatok különböző feladatok során tanúsított viselkedését
  - biofizikai mennyiségekre vonatkozó prediktív modelleket építünk benne

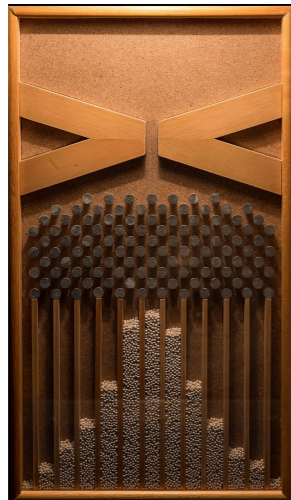


# Mi az, amit tényleg tudunk az agy működéséről?

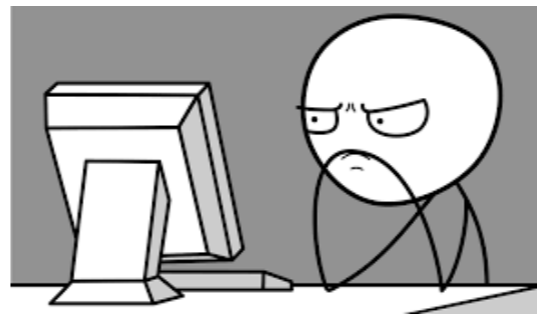
- Anatómiáról sokat tudunk
  - de nem ismerjük az idegsejtek pontos összeköttetési hálózatát (connectome)
  - a lokális összeköttetési mintázatok is csak részben ismertek
- Dinamikáról is sokat tudunk
  - le tudjuk írni egyes neuronok és hálózatok elektromos és kémiai viselkedését
  - de nehezen tudjuk ezt idegrendszeri funkciókhoz kötni
- Lokalizációról is sokat tudunk
  - alacsony szintű érzékelés, motorvezérlés, epizodikus memória, stb
  - sok funkcióról csak sejtések vannak
- Sok receptív mezőt ismerünk
  - feltéve, hogy a megfelelő stimulustulajdonságokat rögzítettük, amikor leírtuk őket
  - objektumokról és magasabbrendű koncepciókról csak tippjeink vannak
- Sokat tudunk arról, hogy hogy kell hasonló problémákat megoldani, mint az agy
  - specializált megoldásokkal, általános problémamegoldó nincs
  - fogalmunk sincs, hogyan fordíthatnánk le ezeket biofizikai implementációra
- Egy kicsit tudunk a reprezentációkról és algoritmusokról, amik a viselkedést szabályozzák
- Nullarendű közelítés: majdnem semmit

# A kurzus menetrendje

<http://golab.wigner.mta.hu/teaching/>



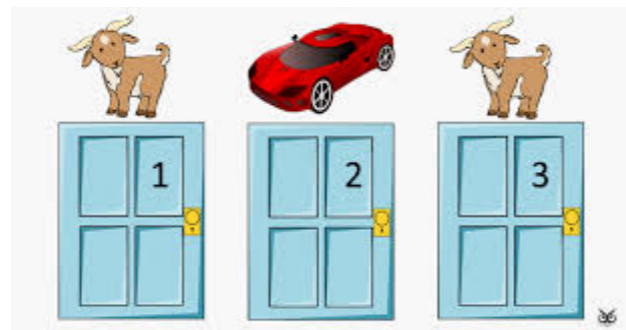
Valószínűségi modellezés



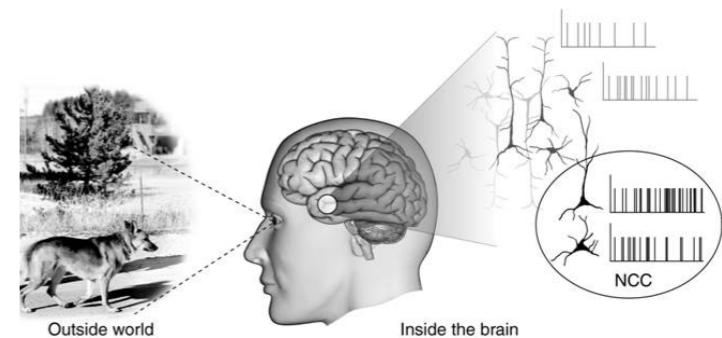
Programozási gyakorlat



Látókéreg modellezése



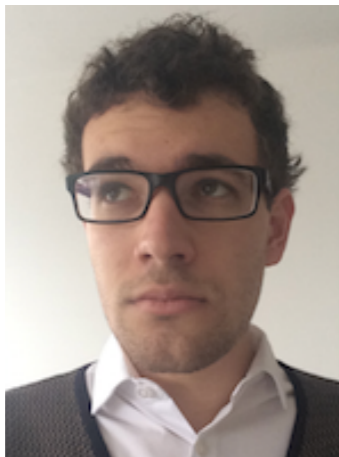
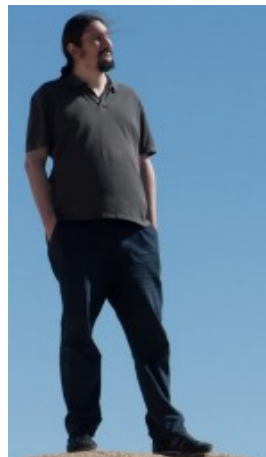
Viselkedés modellezése



Neurális reprezentációk



Intro



# Házi feladat

- Keresd egy érdekes illúziót, és határozd meg, hogy mik a lehetséges értelmezései a szenzorikus bemenetnek (kép, hang, szag, tapintás, stb.)
- Keresd magyarázatot arra, hogy korábban tanult szabályosságok vagy az aktuális környezet (kontextus) hogyan befolyásolja azt, hogy mit érzékelünk