

## Tanulmányok

# BELÜLRŐL KIFELÉ KONSTRUÁLT VILÁG<sup>1,2,3</sup>

## CONSTRUCTING THE WORLD FROM INSIDE OUT

Buzsáki György

az MTA külső tagja, egyetemi tanár  
New York University Neuroscience Institute, New York, USA  
Gyorgy.Buzsaki@nyulangone.org

### ÖSSZEFOGLALÁS

Napjaink idegtudományát áthatja az empirikus filozófia, amely azt feltételezi, hogy az agy célja az érzékelés, a világ reprezentálása, illetve az igazság megismerése. E megközelítés kikerülhetetlen következményeként kénytelenek vagyunk azt feltételezni, hogy egy döntéshozó homunkulusz csücsül beékelődve az agyunk érzékelő és cselekvést irányító részei között. Ezzel szemben, a véleményem szerint, az agy alapvető funkciója a cselekvések kiváltása, illetve ezen akciók következményeinek előrejelzése – ezáltal támogatva az agy gazdájának túlélését és boldogulását. Csak a tettek révén bizonyosodhat meg az agy a szenzoros bemenetek relevanciájáról, csak így tulajdoníthat nekik jelentést, és értelmezheti őket. Ebben, a „belülről kifelé” értelmezési keretben az agy előre konfigurált és önszerveződő dinamikával rendelkezik, ami meghatározza, hogy hogyan cselekszik, és hogyan látja a világot. Az agy nem egalitárius szerveződésében az előzetesen is létező, de értelmet nem hordozó agyi mintázatok az akción alapuló tapasztalás révén telnek meg jelentéssel.

### ABSTRACT

Current neuroscience is largely fueled by an empiricist philosophy that assumes the brain's goal is to perceive, represent the world, and learn the truth. An inevitable consequence of this framework is the assumption of a decision-making homunculus wedged between our perception and actions. In contrast, I advocate that the brain's fundamental function is to induce actions and predict the consequences of those actions to support the survival and prosperity of the brain's host. Only actions can provide a second opinion about the relevance of the sensory inputs and

<sup>1</sup> A cikk eredeti, angol nyelvű változata a *Scientific American* folyóiratban jelent meg: Constructing the World from Inside Out. *Scientific American*, 326, 6, 36–43. June 2022. DOI: 10.1038/scientificamerican0622-36

<sup>2</sup> Fordította: Molnár Csaba

<sup>3</sup> Illusztrációk: Islenia Milien

provide meaning for and interpretation of those inputs. In this 'inside-out' framework, the brain comes with a preconfigured and self-organized dynamic that constrains how it acts and views the world. In the brain's nonegalitarian organization, preexisting nonsense brain patterns become meaningful through action-based experience.

**Kulcsszavak:** empirizmus, tanulás, önszerveződés, percepció-akció, döntéshozatal

**Keywords:** empiricism, learning, self-organization, perception-action, decision making

*Buzsáki György*

*Az idegi hálózatok kutatója. Az emlékek kialakulásának mechanizmusait vizsgálja, illetve azt kutatja, hogy az agyi ritmusok hogyan bontják szakaszokra az idegi információt, hogy ezzel segítsék a kogníciót. 2011-ben megosztott Agy-díjjal tüntette ki a Lundbeck Alapítvány. Buzsáki legújabb könyve a The Brain from Inside Out (Oxford University Press, 2019).*

#### AZ AGYUNK MINTÁT VESZ A FIZIKAI KÖRNYEZETÜNKBŐL, HOGY CSAK A TÚLÉLÉSHEZ ÉS A BOLDOGULÁSHOZ SZÜKSÉGES INFORMÁCIÓVAL KELLJEN FOGLALKOZNI

Fiatal szemináriumvezetőként a tankönyvekhez hűen tanítottam a neurofiziológiát az orvostanhallgatóknak, és lelkesen magyaráztam nekik, hogy az agy hogyan érzékeli a külvilágot, hogyan irányítja a testet. A szemekből, a fülekből és más érzékszervekből érkező szenzoros információ elektromos impulzusokká alakul, majd a szenzoros kéreg megfelelő részeibe érkezik. Ez az agyterület feldolgozza az érzékszervi bemeneteket, és kialakítja a percepciót. A mozgás kezdeményezésekor a motoros kéregből érkező impulzusok arra utasítják a gerincvelő idegsejtjeit, hogy összehúzódnak és váltanak ki az izmokból.

A legtöbb hallgató meg volt elégedve az én tankönyvízü magyarázatommal az agy *input-output* mechanizmusairól. Néhányan (az okosabbak) azonban folyton zavarba ejtő kérdéseket tettek fel. „Hol történik a percepció az agyban?” „Mi indítja el az ujjak mozgását, mielőtt a motoros kéreg idegsejtjei tüzelnének?” Mindig egy egyszerű válasszal intéztem el a kérdéseiket: „Mindez a neokortexben történik.” Ezután rutinosan témát váltottam, vagy bedobtam néhány rejtélyes latin kifejezést, amit a hallgatók nem igazán értettek, de mégis elég tudományosan hangzottak ahhoz, hogy a határozottságot tükröző megjegyzéseim egy időre elcsendesítsék őket.

Ahogy más fiatal kutatók, én is úgy kezdtem az agyat illető vizsgálódásaimat, hogy nem aggódtam különösebben azon, hogy ez a percepció-akció elméleti keret

helyes volt-e, vagy téves. Sok éven keresztül elégedett voltam a kutatásaim haladásával, illetve örültem azoknak a látványos felfedezéseknek, amelyekből a múlt század hatvanas éveire kialakult az idegtudomány területe. Mégsem hagytam nyugodni, hogy képtelen voltam a legokosabb hallgatóim jogos kérdéseire kielégítő választ adni. Azzal kellett megbirkóznom, hogy olyasmit akarok megmagyarázni, amit én sem értek teljesen.

Az évek során rájöttem, hogy nem csak engem frusztrál ez a helyzet. Sok kollégám, akár bevallották, akár nem, ugyanígy érzett. De volt pozitívum is e vívódásban: a frusztrációk lendületet adtak a karrieremnek. Arra készítettek hosszú pályafutásom során, hogy olyan látásmódot fejlesszek ki, amelynek segítségével alternatív magyarázatot adhatok az agy és a külvilág interakciójára.

Az előttem és más idegtudósok előtt álló legnagyobb kihívás az volt, hogy rájöjjünk, pontosan mi is a tudat. A gondolkodók Arisztotelész óta úgy vélték, hogy a tudat és a lélek kezdetben érintetlen palatáblához hasonlít, *tabula rasa*, amelyre felrajzoljuk élményeinket. E nézet a keresztény és a perzsa filozófusokra is hatott, ahogy a brit empirizmus és a marxista doktrína is táplálkozott belőle. Az elmúlt évszázadban ez az elképzelés átszűrődött a pszichológiába és a kognitív tudományba is. Ezt nevezhetjük „kívülről befelé” szemléletnek is, amely a tudatot a valós világról való tanulás eszközeként írja le. Az ettől különböző, alternatív nézet – amely meghatározta kutatásaimat – viszont azt feltételezi, hogy az agyi hálózatok elsődleges feladata a saját belső dinamikájuk fenntartása, melynek során folytonosan nehezen értelmezhető idegi aktivitásmintázatok tömkelegét generálják. Amikor ez a látszólag véletlenszerű aktivitás előnyös az élőlény túlélése szempontjából, akkor az aktivitás mögött rejlő idegi mintázat értelmet nyer. Amikor egy csecsemő azt gügyögi, hogy „ku-ku”, akkor a szülője boldogan adja oda neki a kutyusát. Így a „ku-ku” hang új értelmet kap: a kutyust. Az idegtudomány legújabb fejlődése megerősítette ennek az elméleti keretnek a helyességét.

### AZ AGY „REPREZENTÁLJA” A VILÁGOT?

Az idegtudomány megörökölte az „üres palatábla” szemléletet, noha már évezredek teltek el azóta, hogy a korai gondolkodók megalkották például a „*tabula rasa*” kifejezést a mentális műveletek elnevezésére. Mind a mai napig keressük azokat a mentális mechanizmusokat, amelyek kapcsolatban állhatnak e megálmódott ideákkal. A kívülről befelé megközelítés dominanciáját jól mutatják a legendás tudósduó, David Hubel és Torsten Wiesel kiemelkedő felfedezései, akik bevezették az egysejtes elvezetésen alapuló kísérleteket az agyi látórendszer vizsgálatában, amiért 1981-ben orvosi és fiziológiai Nobel-díjjal tüntették ki őket. Klasszikus kísérleteik során rögzítették az állatok neuronális aktivitását, miközben különböző alakzatok képeit mutatták nekik. Ezek között voltak mozgó vonalak, élek, sötét

és világos területek, illetve más fizikai tulajdonságokkal bíró képek, amelyek különböző neuroncsoportok tüzelését váltották ki. A feltételezésük szerint az idegi számítás (komputáció) egyszerű mintázatokkal kezdődik, amelyek aztán egyre összetettebb alakzatokká állnak össze. Ezek a jellegzetességek aztán összekapcsolódnak valahol az agyban, hogy létrehozzák az adott tárgy reprezentációját. Ebben nincs szükség aktív részvételre, az agy automatikusan végrehajtja a feladatot.

A kívülről befelé értelmezési keret azt feltételezi, hogy az agy elsődleges funkciója a külvilágból érkező jelzések „érzékelése” és megfelelő értelmezése. De ha ez a feltételezés helyes, akkor további műveletekre van szükség ahhoz, hogy az agy reagáljon e jelzésekre. Az érzékszervi bemenetek és a kimenetek közé ékelődve ott kell lennie egy hipotetikus központi processzornak, amely veszi a környezet érzékszervi reprezentációját, és döntéseket hoz arról, hogy mit kezdjen velük a megfelelő akció kialakítása érdekében.

Tehát mi is pontosan ez a központi processzor ebben a kívülről befelé paradigmában? Nos, ennek az alig értett és meglehetősen spekulatív valaminek számos nevet adtak – szabad akarat, homunkulusz, döntéshozó, végrehajtó funkció, beavatkozó ágens vagy egyszerűen csak „fekete doboz”. Mindez kizárólag a kísérletező filozófiai preferenciáitól függött, illetve attól, hogy a kérdéses mentális műveletet az emberi agyra akarta-e alkalmazni, esetleg más állatok agyára vagy számítógépes modellekre. De ettől még e koncepciók mind ugyanarra a dologra utalnak.

A kívülről befelé modell implicit gyakorlati következménye, hogy a jelenkori idegtudomány előtt álló következő feladat az kell legyen, hogy megtaláljuk, vajon e feltételezett központi processzor hol lakozik az agyban, majd szisztematikusan feltárjuk a döntéshozatal idegi mechanizmusait. És valóban, a döntéshozatali mechanizmusok fiziológiája a jelenkori idegtudomány egyik legnépszerűbb témájává vált. Sokan a felsőbbrendű agyterületeket, például a prefrontális kérget tartják az agy azon régióinak, ahol „minden szál összefut”, és ahol „minden kimenet létrejön”. Csakhogy, ha alaposabban megnézzük, kiderül, hogy a kívülről befelé szemléletmód nem tartható.

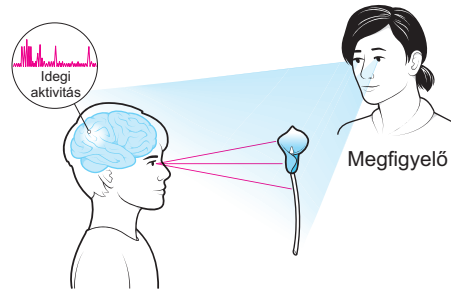
Ez a megközelítés ugyanis képtelen megmagyarázni például azt, hogy a retinát elérő fotonok hogyan hozzák létre végső soron a nyári napsütés érzékletét. A kívülről befelé értelmezési keret tehát megköveteli az emberi szemlélő mesterséges beillesztését, aki megfigyeli ezt az eseményt (lásd a keretes írást az 1444. oldalon). A folyamat közepén helyet foglaló megfigyelő léte azért szükséges, mert még ha az idegsejtek meg is változtatják tüzelési mintázatukat, amikor az érzékszervek receptorait stimulus éri – legyen az például fény vagy hang –, ezek a változások önmagukban nem „reprezentálnak” semmit, amit aztán az agy magáévá tehet. A látókéreg azon neuronjainak, amelyek például egy rózsza képére reagálnak, fogalmuk sincs semmiről. Ezek az idegsejtek nem „látják” a virágot. Mindössze elektromos oszcillációkat hoznak létre az agy más területeiről, többek között a retinából induló, sokszorosán összetett ingerületvezetési utakon érkező bemenetek hatására.

## KÍVÜLRŐL BEFELÉ VAGY BELÜLRŐL KIFELE

Az az elképzelés, miszerint az agy eredetileg „tisztá lappal” kezdi az életet, amit aztán a tapasztalatok töltenek meg írással, már ősidők óta létezik, és módosított formában mindmáig érzeteti hatását. De néhány idegtudós megkérdőjelezte ezt az elméletet, mert a működéséhez nehezen igazolható feltételezésekre van szükség arról, ahogy érzékeljük és feldolgozzuk a külvilág eseményeit. Legfőképpen pedig be kell hoznunk az elméletbe egy hipotetikus „értelmezőt”, hogy megmagyarázzuk a folyamatokat.

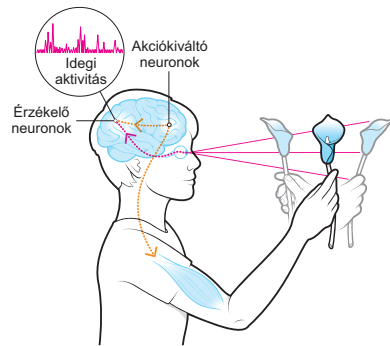
### Kívülről befelé megközelítés

Az inger – például egy virág képe – eléri a szemet, az agy pedig idegsejtek kisütésével válaszol erre. De ez az elmélet csak egy „megfigyelő” feltételezésével válik hihetővé, aki kapcsolatot létesít a virág és az általa kiváltott idegi reakciók között. De a megfigyelővel ellentétben a kéreg idegsejtjei nem „látják” a virágot.



### Belülről kifelé megközelítés

Az alternatív, belülről kifelé értelmezési keret elveti a megfigyelőt. Ehelyett azt feltételezi, hogy a tanulást elősegítő akciók (például a virág mozgatása) révén értjük meg a külvilágot. E feladat végrehajtása érdekében az akciót kiváltó neuronok által küldött neuronális minták kombinálódnak az érzékszervi bemenetekkel, és így értjük meg a tárgy méretét, alakját és más tulajdonságait. Ebből értelmezhető kép jön létre, ami már lehetővé teszi az idegsejteknek, hogy „lássák” a virágot.



Más szavakkal, a szenzoros kérgi neuronok, sőt még a hipotetikus központi processzor sem képes „látni” a külvilág történéseit. Nincs az agyban olyan értelmező ágens, amely jelentést társítana a megváltozott idegi aktivitási mintázatokhoz. Nem létezik mesebeli, mindentudó homunkulusz, aki az agy összes idegsejtjének aktivitását figyeli. A tüzelő neuronoknak fogalmuk sincs arról az eseményről, ami változást idézett elő az aktivitási mintázatukban. Az idegi aktivitás fluktuációi csak a kutató számára nyernek értelmet, ha abban a kivételes helyzetben van, hogy egyszerre figyelheti meg az agyban lejátszódó eseményeket és a külvilág történéseit, majd összehasonlíthatja a két megfigyelést.

### AMIT TESZÜNK, AZ A PERCEPCIÓ

Mint ahogy az idegsejtek közvetlenül nem értesülnek a külvilágról, szükségük van egy módszerre, amelynek segítségével összevethetik vagy validálhatják a tüzelési mintázatukat valamilyen referenciával. Itt a validálás az agyi ingerületvezetési körök azon képességét jelenti, hogy értelmet tudnak társítani az érzékszervi bemenetek hatására megváltozó tüzelési mintázatoknak. E feladatot úgy hajtják végre, hogy az aktivitást valami máshoz hasonlítják. A „tá-tá-ti” Morse-kód csak akkor nyer értelmet, ha korábban a G betűhöz kapcsolták. Az agyban csak akkor juthatunk hozzá az előfeltevést megerősítő vagy cáfoló független véleményhez, ha akciót kezdeményezünk.

Akkor tanuljuk meg, hogy a vízbe merülő, és emiatt töröttnek látszó bot valójában ép, ha megmozdítjuk. Ehhez hasonlóan, a két fa és két hegycsúcs közötti távolság először azonosnak tűnhet számunkra, de ahogy arrébb megyünk, és így megváltoztatjuk a nézőpontunkat, felfedezzük a közöttük lévő különbséget.

A kívülről befelé megközelítés a percepció-döntés-akció eseményláncolatot követi. Ebben a modellben a specializálódott érzékelő agyterületek neuronjait a külvilágból érkező ingerek „irányítják”, és így nem képesek az aktivitásukat valami máshoz igazítani. De az agy nem sorosan dolgozza fel a bemeneteket, nem egymás után halad mindig végig ugyanazokon a lépéseken. Ehelyett a személy minden cselekvése közben az agy motoros területei tájékoztatják a többi kérgi régiót a kiváltott akcióról, ezt az üzenetet „következményes kisülésnek” (corollary discharge) nevezzük.

Az akciót kezdeményező idegi körök két feladatot is ellátanak. Az egyik feladatuk, hogy parancsot küldjenek például a szemmozgató izmoknak és más érzékszervek izmainak (többek között az ujjaknak, a nyelvnek). Ezek a körök optimális pozícióba irányítják az érzékszerveket, hogy alaposan kivizsgálják a bemenet forrását, ezáltal segítik az agyat abban, hogy meghatározza az érzékszervekből bejövő, kezdetben zavaros inger jellegét és irányát.

Ugyanezen akciókiváltó idegi körök második feladata az, hogy értesítéseket (következményes kisüléseket) küldjenek a szenzoros és magasabb rendű agyterületeknek. Ezek hasonlóan működnek, mint a tértivevények. Azok az idegsejtek, amelyek kiváltják a szemmozgásokat, egyúttal arról is értesítik a látókéreg régióit, hogy mi történik, és tisztázzák a látvány bizonyos elemeit (például, hogy a virágot a szél vagy a megfigyelő ember mozgatja).

A következményes kisülések jelentik tehát azokat a megerősítő érzékelési köröket, amelyek kellenek a validációhoz – vagyis annak megerősítéséhez, hogy „a saját akcióm okozza a változást”. Hasonló következményes üzenetek érkeznek a többi agyterületre is, amikor az illető megvizsgálja a virágot, a virág kapcsolatát saját magával és a külvilág más elemeivel. E kutakodás nélkül a virágról érkező ingerek – vagyis a tapasztalatlan agyhoz kapcsolódó retinába beeső fotonok – önmagukban soha nem lennének képesek létrehozni a virág méretéről vagy alakjáról alkotott értelmes képet. Tehát a percepciót úgy definiálhatjuk, hogy ez az, amit *teszünk* – nem pedig az, amit passzívan befogadunk az érzékszerveinken keresztül.

Demonstrálhatjuk is a következményes kisülés mechanizmusának egyszerűsített változatát. Takarjuk le kezünkkel az egyik szemünket, majd oldalról óvatosan nyomjuk el a másik szemünket az ujjbegyünkkel befelé, nagyjából háromszor másodpercenként, miközben ezt a szöveget olvassuk. Azonnal látni fogjuk, hogy az oldal látszólag ide-oda mozog. Ezzel szemben, ha olvasunk, vagy körbetekintünk a szobában (vagyis nem az ujjunkkal, hanem aktívan mozgatjuk a szemünket), akkor a környezet állónak tűnik. Ezen állandóság érzete azért alakul ki, mert a szemmozgató neuronok következményes jelzést küldenek a látókéregnek, amelyek arról tájékoztatják, hogy vajon az egész világ mozog-e, vagy csak a szemgolyó, és ez lehetővé teszi a környezet képének stabilizálását.

## TANULÁS ÖSSZEHAJONLÍTÁS ÚTJÁN

A kívülről befelé és a belülről kifelé megközelítések közötti kontraszt még élelőbbé válik, amikor ezeket az elméleti kereteket a tanulási mechanizmusok magyarázatául használjuk. A tisztalapmodell kimondatlan feltételezése szerint a tapasztalatok bővülésével az agy összetettsége növekszik. Ahogy tanulunk, az agyi körök közötti interakcióknak egyre inkább bonyolultabbakká kell válniuk. A belülről kifelé megközelítés szerint azonban nem a tapasztalat az agyi komplexitás fő forrása

Ehelyett az agy úgy szerveződik, hogy előzetesen kialakított tüzelési mintázatok hatalmas repertoárját tartalmazza, amelyeket idegi trajektóriáknak neveznek. Ez az önszerveződőagy-modell olyan szótárhoz hasonlítható, amelyet először értelmetlen szavak töltenek meg. Az új tapasztalat nem változtatja meg e hálózata-

tok működését, például teljes aktivitásszintjüket. A tanulás inkább az előzetesen is létező idegi trajektóriák és a külvilág eseményeinek összehasonlításával vagy egyeztetésével történik.

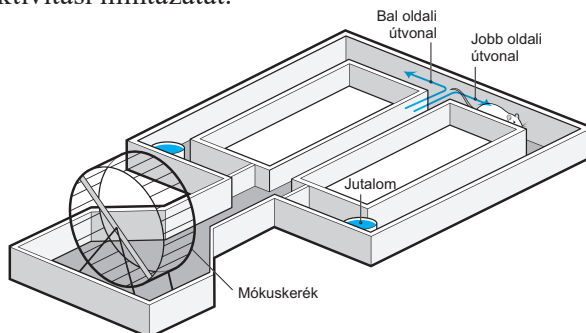
Ahhoz, hogy megértsük ezt az összehasonlító folyamatot, meg kell vizsgálnunk azokat az előnyöket és kényszereket, amelyeket az agyi dinamika a tapasztalásra kifejt. A tisztalapmodell alapvető változatában az idegi hálózatok nagyrészt hasonló, véletlenszerűen kapcsolódó idegsejtekből állnak. A feltételezés szerint ezek az agyi hálózatok rendkívül plasztikusak, és bármely tetszőleges bemenet megváltoztathatja az idegi körök aktivitását. De azonnal kitűnik e megközelítés gyengesége, ha megvizsgálunk egy példát a mesterséges intelligencia (MI) területéről. A klasszikus MI-kutatás – különösen annak konnekcionizmusnak hívott ága, amely a mesterséges neuronháló alapját képezi – a kívülről befelé-megközelítéshez, vagyis a tabula rasa-modellhez kapcsolódik. Ezt a domináns nézetet talán legerősebben Alan Turing, a tudatmodellezés nagy úttörője szorgalmazta a 20. században: „A gyermeki agy valószínűleg olyan, mint egy üres füzet, amelyet az írószertöltésben lehet kapni” – írta.

### AZ ELKÉPZELT ELŐTTÜNK ÁLLÓ ÚT

Kísérlettel demonstrálható, hogy különböző idegsejtcsoportok tüzelnek – minden csoport eltérő sorrendben –, amikor a patkány arról sző terveket, hogy a bal vagy jobb oldali útvonalat kövesse, hogy eljusson a jutalomig.

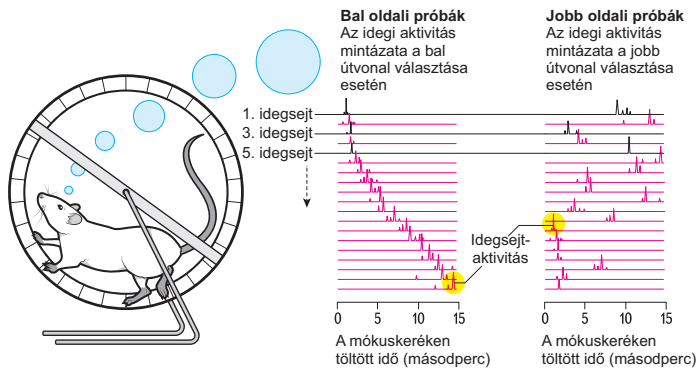
#### Kísérleti elrendezés

Egy mókuskerek található a labirintus bejáratánál, és a jutalmat a jobb vagy bal útvonal helyes választásával lehet elérni. A patkány szabadon választhat a két útvonal közül, miután 15 másodpercig tekerte a mókuskereket. Mind a labirintusban való bolyongás, mind a mókuskerekre idején rögzítjük az idegsejtjei aktivitási mintázatát.



### Eredmények

A patkány idegi aktivitása, miközben a mókuskereket tekerte, megjósolja azt, hogy később melyik útvonalat fogja választani, mintha a patkány elképzelné az előtte álló utat. A „bal oldali próbák” ábrán megjelenített idegi aktivitás különbözik a „jobb oldali próbáktól”. Amikor a bal oldali aktivitás volt jellemző a mókuskereket tekerő patkányra, akkor a bal oldali útvonalat választotta másodpercekkel később.



Azok a mesterséges neuronháló, amelyeket arra építenek, hogy bemeneteket „írjanak” az idegi körökre, gyakran kudarcot vallanak, mert minden egyes új bemenet óhatatlanul is megváltoztatja a kör kapcsolatait és dinamikáját. Erre mondják, hogy a kör plaszticitást mutat. De ez valójában egy csapda. Az MI-rendszer, miközben a tanulás során folyamatosan módosítja a hálózatában meglévő kapcsolatokat, egy megjósolhatatlan pillanatban törölheti a teljes memóriáját. Ezt a hibát „katasztrofális interferenciának” nevezik, és az igazi agyra egyáltalán nem jellemző.

A belülről kifelé megközelítés ezzel szemben azt valószínűsíti, hogy az önszerveződő agyi hálózatoknak ellen kell állniuk az efféle zavarásoknak, mégis szükséges, hogy szükség szerint plasztikusak legyenek. Az agy ezt az egyensúlyt a különböző neuroncsoportok közötti kapcsolatok erősségének jelentős különbségei révén tartja fenn. Az idegsejtek közötti kapcsolatok erőssége folytonos spektrumot követ. A legtöbb idegsejt csak gyengén kapcsolódik másokhoz, míg kisebb hányaduk erős kapcsolatokat tart fenn. Az idegsejtek erősen kapcsolódó kisebbsége mindig riadókészültségben van. Gyorsan képesek tüzelni, azonnal megosztják az információt a csoporton belül, és makacsul ellenállnak a körkörös kapcsolataikat megváltoztatni igyekvő hatásoknak. Az idegsejtek ezen elit alhálózatait, minthogy rengeteg kapcsolattal és magas kapcsolati sebességgel bírnak,

időnként „a gazdagok klubjának” nevezik, és ezek folyamatosan jól informáltak az agy idegi történéseit illetően.

E gazdagklub keményen dolgozik: az összes idegsejt nagyjából húsz százaléka a tagja, mégis ők felelősek az idegi aktivitás majdnem feléért. A gazdagklubbal ellentétben, az agy idegsejtjeinek többsége (vagyis a neuronális „szegényklub”) általában lassan tüzel, és csak gyengén kapcsolódik más idegsejtekhez. Viszont ők erősen plasztikusak, és képesek arra, hogy fizikailag átalakítsák az idegsejtek közötti kapcsolatokat, vagyis a szinapszisokat.

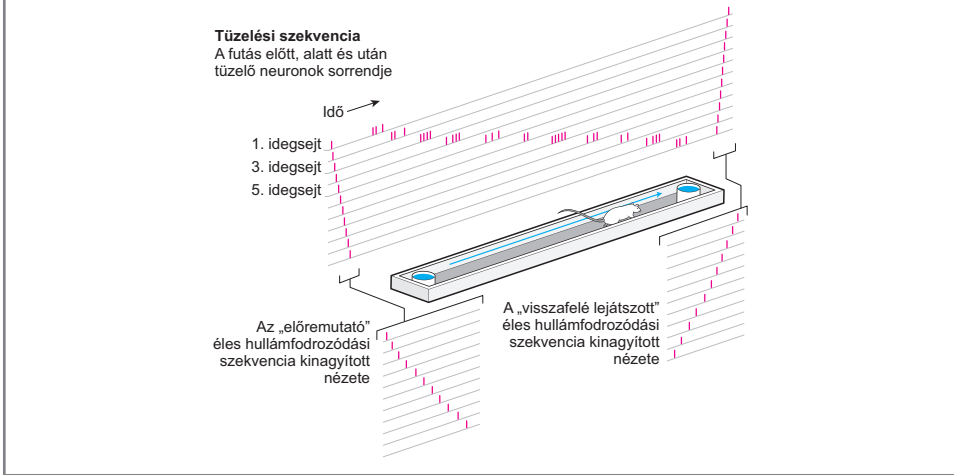
Mind a gazdag-, mind a szegényklubok fontosak az agyi dinamika fenntartása szempontjából. A mindig tettre kész gazdagklub tagjai hasonlóan tüzelnek a legkülönbélebb tapasztalatok hatására is. A legtöbb helyzetben gyors és kielégítő megoldást kínálnak. Nem azért vagyunk képesek egész sikeres találgatásba bocsátkozni az ismeretlenről is, mert tapasztalatokkal rendelkezünk róla, hanem mert az agyunk mindig készenlétben tart feltételezéseket az új, ismeretlen események esetére. Semmi sem tökéletesen újdonság az agy számára, mert az ismeretlen jelenségeket mindig a jól ismertekhez hasonlítja. Generalizál. Még a tapasztalatlan agy is a neuronális trajektóriák hatalmas és azonnal bevethető tárházával van felvértezve, amely lehetőséget kínál arra, hogy a világ eseményeit e már létező agyi mintázatokhoz hasonlítsuk anélkül, hogy ehhez alapvetően át kellene alakítanunk az idegsejtkapcsolatokat. Az önmagát folyamatosan átalakító agy képtelen lenne gyorsan alkalmazkodni a külvilág gyorsan változó eseményeihez.

De a lassú tüzelésű, plasztikus neuronok szerepe is kritikus fontosságú. Ezek az idegsejtek akkor lépnek színre, amikor az élőlény valamilyen jelentős ingerre érzékel, és el kell raktároznia jövőbeli referenciaként. Ezután már mobilizálhatja a hatalmas referenciagyűjteményét, hogy ennek segítségével ismerje fel a történések közötti apró különbségeket. Ehhez bizonyos idegsejtkapcsolatok erősségét meg kell változtatni. A gyerekek azután tanulják meg a kutya szó jelentését, hogy különféle kutyákat láttak. Amikor a gyermek legközelebb egy birkát lát, esetleg azt is kutyának nevezi. Csak akkor fog különbséget tenni a birkák és a kutyák között, amikor ennek a megkülönböztetésnek jelentősége van (például meg kell értenie a házi kedvencek és a haszonállatok közötti különbséget).

#### PRÓBA ÉS VISSZAJÁTSZÁS

Idegsejtek egy csoportja azelőtt, aközben és azután tüzel, hogy a patkány végigszalad egy megemelt pályán. Azok az idegsejtek, amelyek a futás kezdetén és végén tüzelnek gyorsan, ugyanazok, amelyek a futás közben aktívak, és az aktivitásmintázatuk a patkány trajektóriája próbáját vagy visszajátszását (ez esetben a próba fordítottját) adja. E korai és késői aktivitást „éles hul-

lámfodrozódásnak” (sharp wave ripples) nevezzük, és ez teszi lehetővé azt a mentális folyamatot, amely kiválasztja és megjegyzi az optimális útvonalat.



### A KOGNÍCIÓ MINT INTERNALIZÁLT AKCIÓ

Kísérletezőként én nem azzal indultam neki a kutatásnak, hogy felállítok egy, a kívülről befelé megközelítéssel ellentétes elméletet. Csak évtizedekkel azután, hogy elkezdtem az agyi önszerveződő körök, illetve a hippocampusz idegsejtcsoportjai ritmikus aktivitásának tanulmányozását, ismertem fel, hogy az agy jobban el van foglalva önmagával, mint azzal, ami a külvilágban történik. Ez a felismerés aztán teljesen új pályára állította a kutatócsoportom munkáját. A kísérleteink, más kutatócsoportok eredményeivel együtt, feltárták, hogy az idegsejtek aktivitásuk nagy részét arra fordítják, hogy fenntartsák az agy folytonosan változó belső állapotát, szemben azzal, hogy az érzékszervekből érkező stimulusok irányítják őket.

A természetes szelekció révén az élőlények adaptálódnak azokhoz az ökológiai niche-ekhez, amelyekben élnek, és megtanulják a saját akcióik várható kimeneteleit. Ahogy nő az agy összetettsége, egyre bonyolultabb kapcsolatok és idegi számítási folyamatok jelennek meg a szenzoros bemenetek és a motoros kimenetek között. Ez a befektetés lehetővé teszi az eltervezett akciók hatásainak előrejelzését az egyre összetettebb és változékonyabb környezetben, akár messze előre tekintve a jövőbe is. Az egyre kifinomultabb agyak emellett úgy szerveződnek, hogy képesek legyenek számításokat végezni akkor is, amikor a szenzoros bemenet időlegesen eltűnik, vagy az állat cselekvése leáll. Ha behunyjuk a szemünket, akkor is tudjuk, hogy hol vagyunk, mivel a „látás” folyamatának jelentős része az agy aktivitásában magában gyökerezik. Az agyi aktivitás e kötetlen üzemmódja hozzáférést biztosít az elképzelt vagy behelyettesített élmények internalizált, virtuális világához, és számos kognitív folyamat kapujának tekinthető.

Hadd említsek egy példát az agyműködés e kötetlen módjára a halántéklebennyel kapcsolatos kutatásainkból. A temporális lebenyben foglal helyet a hippokampusz, a hozzá közeli entorinális kéreg, illetve a hozzájuk kapcsolódó struktúrák, amelyek a tájékozódás legkülönbözőbb aspektusaiban játszanak szerepet (például az iránykövetésben, a sebesség, a megtett út, a környezeti határok és sok más érzékelésében).

A kutatásunk a hippokampális rendszer funkcióról alkotott vezető elméletekre épül, többek között a University College London Nobel-díjas kutatója, John O'Keefe lenyűgöző felfedezéseire. O'Keefe úgy találta, hogy a hippokampusz idegsejtjeinek tájékozódás közbeni tüzelése egybevág az állat térbeli elhelyezkedésével. Emiatt ezeket a neuronokat helysejteknek nevezzük.

Amikor egy patkány a labirintusban bolyong, a helysejtek meghatározott csoportjai aktiválódnak kötött sorrendben, attól függően, hogy az út mely részén jár éppen. Ebből a megfigyelésből előzetesen azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a környezetből érkező, folyamatosan változó érzékszervi bemenetek kontrollálják az idegsejtek tüzelését, a kívülről befelé modellnek megfelelően.

Más, részben embereken végzett kísérletek azt mutatták, hogy ugyanezeket az idegi hálózatokat használjuk a személyes emléknymainkat kezelő, illetve az elképzelt és jövőbeli cselekvések tervezésével foglalkozó belső világunk fenntartására is. Ha a kogníciót a belülről kifelé nézőpontból közelítjük meg, nyilvánvalóvá válik, hogy a fizikai környezetben történő tájékozódás, illetve a képzeletbeli tájon való bolyongás ugyancsak azonos idegi mechanizmusok révén valósul meg.

Tizenöt évvel ezelőtt a kutatócsoportom elkezdte a térbeli tájékozódás és a memória mechanizmusait vizsgálni a hippokampuszban, hogy ütköztessük egymással a kívülről befelé és a belülről kifelé elméleti kereteket. 2008-ban Eva Pastalkova posztdoktori kutató és én arra tanítottunk patkányokat, hogy felváltva válasszák a labirintus bal és jobb oldali ágát, hogy vizet találjanak. A patkánynak minden próba előtt tizenöt másodpercig forgatnia kellett egy mókuskereket, amely hozzájárult ahhoz, hogy kizárólag a labirintus útvonalairól őrzött memória, és nem pedig környezeti vagy testi jelek alapján válasszon a labirintus egyik vagy másik ága közül. Úgy okoskodtunk, hogy ha a hippokampális neuronok helyszíneket „reprezentálnak” a labirintus folyosóiban és a mókuskerékben, ahogy azt O'Keefe térbeli tájékozódási elmélete prediktálja, akkor néhány idegsejt folyamatosan tüzelni fog, amikor a patkány a labirintus, illetve a mókuskerék meghatározott pontján tartózkodik éppen. Ezzel szemben, ha az idegsejtek tüzelését a belső agyi mechanizmusok váltják ki, amelyek egyszerre játszhatnak szerepet a navigációban és a memóriában is, akkor az idegsejtek tüzelésének időtartama várhatóan hasonló lesz minden helyszínen, így a kerék belsejében is.

E kísérletek eredményei megcáfolták a kívülről befelé magyarázatokat. A több száz nyomon követett idegsejt egyike sem tüzelt folyamatosan, miközben a patkány a kereket tekerte. Ezzel szemben egy csomó idegsejt tüzelt röviden egymás után, folyamatos szekvenciát alkotva.

E neuronokat nyilvánvalóan nem nevezhetjük helysejteknek, hiszen az állat nem változtatott helyet, miközben az egy helyben forgó mókuskereket tekerte. Emellett, az egyedi idegsejtek aktivitásmintázata ebben az idegi trajektóriában nem különíthető el azon neuronokétól, amelyek akkor aktiválódtak, amikor a patkány a labirintus ágaiban haladt.

Amikor az egyedi próbákat aszerint csoportosítottuk, hogy az állat mely oldali ágot fogja a következő alkalommal választani, a neuronális trajektóriák mind különbözőnek mutatkoztak. Ezek az eltérő trajektóriák kizárták annak lehetőségét, hogy az idegsejtek aktivitási szekvenciája a lépések számolása, az idegi erőfeszítés becslése vagy a testre ható más, nem észlelt stimulusok révén áll elő. Emellett az egyedi neuronális trajektóriák lehetővé tették, hogy előre jelezzük az állat oldalválasztását, attól a pillanattól kezdve, hogy belépett a kerékbe, majd tekerte azt, hiszen ez idő alatt a patkánynak észben kellett tartania, hogy előzetesen mely labirintuságot látogatta meg. Az állatnak mindig felváltva kellett választani a bal vagy jobb oldali labirintuságot ahhoz, hogy megkapja a jutalmat (lásd a keretes írást az 1447. oldalon).

Ezek a kísérletek arra vezettek bennünket, hogy a belső mentális utazásainkat ugyanazok a neuronális algoritmusok irányítják, mint amelyeket arra használunk, hogy eltaláljunk a közértbe. A külvilágtól független tájékozódás során a személyes emlékezetünkben őrzött eseményeken, az úgynevezett epizodikus memóriánkon haladunk keresztül.

A valóságban azonban az epizodikus memórianyomok többek múltbéli események emlékezeténél. Ezek azt is lehetővé teszik számunkra, hogy a jövőbe tekintsünk, és tervezzünk. E memória afféle keresőmotorként működik, amelynek segítségével mind a múltból, mind a jövőből mintát tudunk venni. Ez a felismerés a nómenklátúra kibővítését is szükségessé teheti. E kísérletek ugyanis megmutatták, hogy a helysejtek aktivitásának változásait előzetesen konfigurált belső szekvenciák irányítják, és e szekvenciák közül minden labirintusfolyosó esetén egyedileg választ az állat. Ugyanazok a mechanizmusok így különféle funkciót láthatnak el – így e sejteket a körülményektől függően nevezhetjük helysejteknek, memóriasejteknek vagy akár tervezősejteknek is.

A kötetlen idegsejtműveletek fontosságát támasztja alá az az „offline” agyi aktivitás is, amikor az állat csak céltalanul bóklászik, látszólag nem csinál semmit, a jutalmat fogyasztja éppen, vagy alszik. Amikor a patkány a saját ketrecében pihen a labirintus felfedezése után, a hippocampusza rövid, önszerveződő neuronális trajektóriákat hoz létre. Ezek az éles hullámfodrozódások százezred másodperces időablakokban jönnek létre, és ugyanazokat a neuronokat aktiválják újra, amelyek a labirintusbéli haladás során több másodpercen keresztül aktívak voltak, ezzel mintegy megismétlik, összefoglalják azokat a neuronális szekvenciákat, amelyek a labirintusban való bolyongás közben jelentek meg. Az éleshullámfodrozódás-szekvenciák közreműködnek a hosszú távú memórianyomok kialakításában, és essen-

ciálisak a normális agyműködéshez. És valóban, ha ezek az éles hullámfodrozódások megváltoznak kísérleti beavatkozás vagy betegségek következtében, az súlyos emlékezetkiesést okoz (lásd a keretes írást az 1449. oldalon).

Az elmúlt évtizedben állatokon és embereken végzett okos kísérletek segítségével kimutatták, hogy ezek az időben összesűrített fodrozódó események olyan belső próba-szerencse folyamatot alkotnak, amely a tudat alatt valós vagy fikatív alternatív forgatókönyveket hoz létre. Ez segíti az optimális stratégiáról szóló döntés meghozatalát, új következtetések levonását és a jövőbeli akciók tervezését. Mindezt úgy, hogy tényleges kísérletek által nem szükséges azonnal tesztelni őket. Ilyen értelemben a gondolataink és a terveink valójában elhalasztott cselekedetek, a kötetlen agyi aktivitás pedig igazából az agy aktív és esszenciális működése. Ezzel szemben a kívülről befelé elmélet nem tesz kísérletet arra, hogy feladatot tulajdonítson a nyugalomban vagy alvás közben megfigyelhető kötetlen agyműködésnek.

#### A BELÜLRŐL KIFELÉ-MEGKÖZELÍTÉS JELENTŐSÉGE

A belülről kifelé-megközelítésnek az elméleti következményei mellett számos praktikus alkalmazása is lehetséges. Segíthet az agyi betegségek jobb diagnosztikus eszközeinek kutatásában. A jelenlegi terminológia gyakran nem képes pontosan leírni a mentális vagy neurológiai betegségek háttérében húzódó biológiai mechanizmusokat. A pszichiáterek tudatában vannak e problémának, de a megoldását eddig hátráltatta, hogy nem ismertük eléggé a patológiás mechanizmusokat, illetve ezek kapcsolatát a tünetekkel és a gyógyszerekre adott reakciókkal.

A belülről kifelé elméletet az MI-kutatás legelfogadottabb konnekcionista modelljei alternatívájának kell tekinteni. Ezek helyett olyan MI-modelleket építhetnénk, amelyek fenntartják a saját önszerveződő aktivitásukat, majd az „egyeztetés” révén tanulnak, ahelyett hogy folyamatosan módosítanák kapcsolati struktúrájukat. Az ily módon felépített gépek leválaszthatnák működésüket a szenzorok biztosította bemenetekről, és a komputáció új formáit hozhatnák létre, amelyek hasonlíthatnának az ember kognitív folyamataihoz.

A valós agyban azok az idegi folyamatok, amelyek az érzékszervi bemenetek-től elkülönítetten zajlanak, együttesen működnek a külvilággal folytatott interakciót elősegítő mechanizmusokkal. Minden agy, legyen az egyszerű vagy összetett, ugyanazokat az alapelveket használja. A külvilágból származó tapasztalatok által folyamatosan kalibrált kötetlen idegi aktivitás a kogníció lényege. Bárcsak tudatában lettem volna ennek, amikor az okos orvostanhallgatóim feltették nekem jogos kérdéseiket, amelyeket túl gyorsan söpörtem félre.