

Miből él az emlék?

„Ha van a természetünknek olyan képessége, amelyet csodálatosabbnak lehet nevezni a többinél, azt hiszem, az emlékezet az. Működésében, hibáiban, kihagyásaiban is valahogy érthetlenebb jelenségekkel szolgál, mint a szellem egyéb területei. Az emlékezet néha mindent megőriz, szolgálatkész, engedelmes; máskor zavaros és gyönge, ismét máskor zsarnoki és ellenőrizhetetlen! Kétségtelen, hogy az ember minden tekintetben valóságos csoda; de az a képessége, amellyel emlékezik és felejt, különösen rejtélyesnek látszik.”¹

Igy gondolja Fanny Price, Austen béketűrő hősnője *A mansfieldi kastély*ban. A regény megírása után a pszichológusoknak fél évszázadnál is tovább tartott, hogy megkíséreljék a laboratóriumi tudományosság hatókörébe vonni a zsarnoki és ellenőrizhetetlen emlékezetet, és majdnem újabb félszáz év telt el addig, amíg tárgyává nem lett a feltörekvő ideglettan molekuláris vizsgálatainak és magabiztos állításainak. A mai idegtudomány azonban nem Austenra koncentrálna, hanem Emily Dickinsonra fókuszál tudásforrásként, s az élenjáró tudósok újjongva idézik a versét:

Az Agy – az Égnél tágasabb
Hisz – egymás oldalán –
Ez azt magába felveszi
S ott vagy – Te is – simán.²

Élethosszig tartó kutatásaim után azonban a biokémiai folyamatoknak és a sejtek újraformálódásának feltérképezése nyomán, amelyeket – úgy tűnik – még a legegyszerűbb tanulási tapasztalatok is kiváltanak a csirkéimben (azokban a kísérleti állatokban, amelyek ugyan akarattuk ellenére, de három évtizednél hosszabb időn át részt vettek az emlékezetre irányuló tanulmányaimban), be kell vallanom: még mindig nem érzékelem, hogy többet tettünk volna annál, hogy elmélyítettünk néhány rejtélyt. Fanny Price előtt ezeröttszáz évvel Szent Ágoston a *Vallomások* című könyvében felsorol pár magyarázatra szoruló jelenséget. Az emlékezet, mondja, „tágas palota, számtalan kép tárháza.” (10.8) Az emlékezet azonban kiszámíthatatlan. Egyes emlékdarabok akaratlanul kilöködnek, míg mások késleltetéssel bukkannak elő. Az emlékezet képesít, hogy színeket lássunk még sötétben is, ízt érzünk élelem nélkül, halljunk hangok hiányában. „Mind-

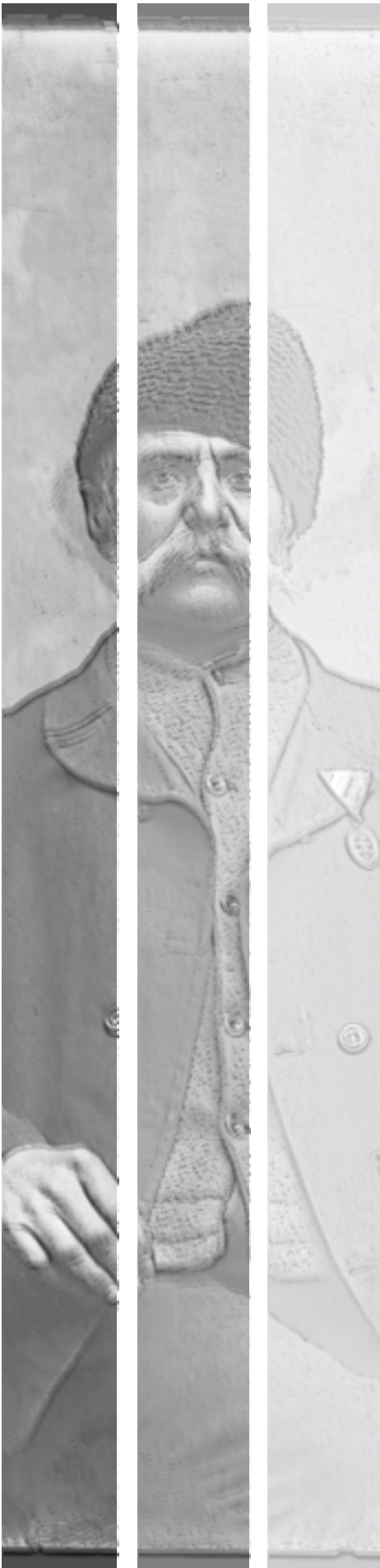
1 Jane Austen: *A mansfieldi kastély*. Ford. Réz Ádám, Budapest: Európa, 1978, 196. TPB.

2 Emily Dickinson: *The Complete Poems*. Szerk. Thomas H. Johnson, London: Faber, 1991, 312. oldal, 632. vers, 1. versszak, ford. Tóta Péter Benedek.

ez belül, emlékezetem roppant csarnokaiban történik.” (10.8) Az emlékezet tartalmazza mindazt, „amit a szabad tudományokból megtanultam, kivéve azt, amit elfelejtettem ... a számok és a kiterjedések számtalan szabályát és törvényét ... az érzelmeimet, de nem ugyanúgy, ahogyan a lélekben jelennek meg, amikor az megtapasztalja őket, hanem egészen másként ...” (10.8, 10.12, 10.14), és olyasmiket is, mint a hamis érvek, amelyekről tudott, hogy nem igazak. Továbbá arra is rámutat, hogy ha valaki emlékezik valamire, később emlékezhet arra, hogy emlékezett rá. Nem csoda, hogy úgy tűnik: a lélek az agy puszta anyagának fizikai határain túlra szárnyal. Ágoston számára, nem úgy, mint Emily Dickinson esetében, a lélek, és nem az agy az, amely tágasabb az égnél, és én hajlok arra, hogy egyetértsek vele.

Amit a tapasztalati tudományok tenni próbáltak, az természetesen az volt, hogy műveleti meghatározást adjanak az emlékezetnek, úgy szűkítve és megszabva a „tanulási tapasztalatokat”, hogy paramétereik tanulmányozhatók legyenek. A folyamatot Hermann Ebbinghaus indította el, akinek az 1885-ben megjelentetett könyve, *Über das Gedächtnis* (Az emlékezetéről) úttörőnek bizonyult kérdésfelvetésével: vannak-e az emlékezetképződésnek általános törvényei? Ezeknek az általános törvényeknek a felderítésére kitalálta azt az egyszerű technikát, amelyet eltérő formában azóta is állandó eszközként alkalmaznak a pszichológusok – ez a nonszensz szótag, egy három betűből álló sorozat, amelyben két mássalhangzó vesz közre egy magánhangzót, például: HUZ, LAQ, DOK, VER, JIX. Önmagát tekintve alanynak, Ebbinghaus kiderítette, milyen feltételek szükségesek, hogy emlékezzünk az ilyen listákra; az olvasások száma, térközhagyás, és így tovább, mígnem kétszer hibátlanul tudta teljesíteni az egész lista olvasását. Mihelyt megtanulta a listát, tesztelhette, milyen sikerrel jár a lista felidézésével egymást követő eltérő alkalmakkor percek, ill. napok múltával. Ahhoz, hogy mennyiségileg fejezze ki a felidézés folyamatát, csak annyit kellett tennie, hogy feljegyezze, hányszor kellett a listát elolvasnia bármikor a lista megtanulása után ahhoz, hogy újra képes legyen hibátlanul megismételni.

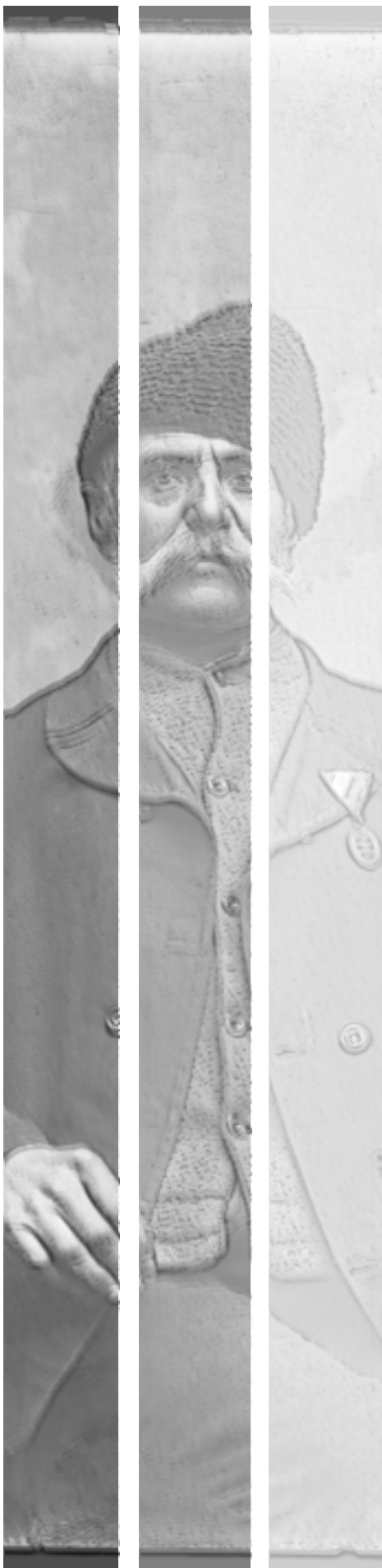
Számos általános szabály vált levonhatóvá ilyen megfigyelésekből. Például bármely, tucatnyi nonszensz szótagból álló ilyen lista közül egyesekre könnyebb emlékezni, mint másikakra – különösen is a lista elején és végén állókra. Ezek az úgynevezett primácia- és recenciahatások. Ezek nyilvánvalónak tűnhetnek, amikor ilyen egyszerűen írjuk le őket, ám Ebbinghaus éppen azt mutatta be világosan, hogy ebben az esetben a józan ész a tudománytól kapott támogatást. Ezen felül azt is igazolta, hogy egy valaha megtanult listát később könnyebb újratanulni. A másodszori megtanulásra fordított kísérletek számának és az előszöri tanulásra tett erőfeszítések számának összehasonlítása olyan számítást eredményez, amely a pszichológiai szakirodalomban



megőrzés néven ismert – ez az emlékezet mérete. A megőrzés pontszámának használata lehetővé teszi az emlékezet veszteségének és stabilizálásának pontosabb meghatározását az idő függvényében. Azt ismerte fel, hogy az emlékezetvesztés többsége a tanulás utáni első percekben következik be; mihelyest az emlékezet túljutott ezen a fázison, sokkal stabilabbnak tűnt, s ez elvezetett a rövid és hosszú távú emlékezet közötti időbeli különbségtételhez, amely a következő kutatások fő elemévé lett.

Ebbinghaus tette meg az első lépést az emlékezet rendszertanának kifejlesztésében, amely nagyban hozzájárult a következő pszichológiai kutatás fókuszának beállításához. Az 1930-as években Frederick Bartlett emlékezetes módon mutatta be, hogy az emlékezetben megőrzött tételek tartalma hogyan változik meg és egyszerűsödik az idő múlásával. Az 1980-as és 90-es években pedig Alan Baddeley állapított meg különbséget a működő emlékezet – azaz úgymond a múlt tapasztalataiból aktuális használatra előhívott emlékezet – és a mélyebben tárolt referenciaemlékezet között. Időközben a részben azonosítható agysérüléssel élő páciensektől származó adatok alapján Endel Tulving és később Larry Squire újabb rendszertani, az emlékezet eltérő osztályai közötti megkülönböztetést vezetett be. A procedurális emlékezet emlékezés arra, *hogyan* csinálunk valamit – biciklizünk, például. A deklaratív emlékezet emlékezés *arra*, hogy azt a bizonyos kétkerekű hajtható tárgyat biciklinek hívjuk. A deklaratív kettéoszlik szemantikus (Ágoston számai és kiterjedései) és epizodikus, vagyis önéletrajzi emlékezetre – epizódok előhívásai valaki saját életéből.

Egy neurobiológus számára kulcsfontosságú kérdés, hogyan mutatkoznak meg ezek az emlékezetformák az agyban. A kategóriák a különböző agyi régiók és a különböző molekuláris folyamatok kapcsolódását tükrözik-e, vagy ezek magasabb szintű megkülönböztetések-e az agyi korrelációk társítása nélkül? A legutóbbi évtizedekig ezeknek a kérdéseknek az egyetlen hatékony kezelési módja az emberek viszonylatában az volt, hogy megfigyelték az agyi károsodás és betegség különböző formáinak az emlékezetre gyakorolt hatásait. A klasszikus kórokozta emlékezetvesztés, amelyet jelesül a manapság gyakrabban Alzheimer-kórnak nevezett időskori demencia idéz elő, nem ad választ ezekre a kérdésekre, mert az általuk okozott agykárosodás egyszerre súlyosbodó és nagyon is szokásos. Ennek ellenére a sztrók vagy egy baleset – vagy műtétileg előidézett károsodás – következményei tanulságosak lehetnek. A iatrogén emlékezetvesztés leghíresebb esete egy epilepsziás páciensé, akit a rendszerszemléletű idegtudomány minden művelője a monogramja (HM) alapján ismer, akit az 1950-es években megoperáltak, hogy eltávolítsák belőle a halántéklebeny és hippocampusz részeit az epilepsziás központ kiküszöbölése érdekében. Végeredményként végzetes veszteség érte azt a képességét, hogy rövid távú em-



lékezetét hosszú távúvá alakítsa. HM, aki továbbra is a kutatás tárgya maradt a következő félszáz évben, képes az operáció idejéig terjedő eseményekre emlékezni, de bármely új tapasztalatot percekben belül elfelejt. Bár képes új készségek szabályszerű elsajátítására, nem képes megőrizni a deklaratív – különösen is az epizodikus, önéletrajzi – emlékezetet. Az események, saját kifejezésével élve, egyszerűen eltűnnek; azt mondja, „mindegyik nap magának való”. Ez a megfigyelés, amelyet hamar állatok tanulmányozása egészített ki, azt sugallja, hogy a hippokampusz kulcs-szerepet játszik az új élmények rögzítésében, valamint, hogy nélküle és a környező agyi régiók nélkül az adatok többé nem továbbíthatók a hosszú távú emlékezetbe.

A legutóbbi évtizedekben az élő emberi agyban zajló emlékezetfolyamatok tanulmányozásának lehetősége átalakult az új technológiák beköszöntevel, jelesen a funkcionális mágneses rezonanciavizsgálat (fMRI) és a magnetoencefalográfia (MEG) ablaknyitásával. Az előbbi lehetővé teszi az agy kis régióhoz folyó véráramlás változásainak mérését annak a feltevésnek a fényében, hogy minél magasabb sebességgel áramlik a vér, annál aktívabb az a régió bármely sajátos körülmény esetén, például tanulási vagy emlékezési feladatvégzése közben. Az utóbbi kihasználja annak a lehetőségét, hogy a jeladás az agyban elsősorban elektromos esemény, és az elektromos áramlást parányi változások kísérik az áramlást körülvevő mágneses mezőben. Mindkét eljárás meglehetősen nagyfokú műszerezettséget kíván; az fMRI alkalmasabb a változás helyének meghatározására, az MEG leginkább azt segíti, hogy feltérképezzük az időbeli dinamikát, lehetővé téve az agyban végbemenő változások ábrázolását ezredmásodpercről ezredmásodpercre.

Két példa megvilágítja, mi tudható meg ilyen technikákkal. Eleanor Maguire és munkatársai kutatásukban londoni taxisofőröket kértek arra fMRI alkalmával, hogy idézzenek fel egy komplex útvonalat a városban. Az útvonal felidézése aktiválta a hippokampuszukat. A mi saját kísérleteinkben MEG alkalmazása mellett alanyainkat virtuális szupermarketbeli bevásárló útra vittük arra kérve őket, hogy válasszanak ki megvásárlandó árucikkeket múltbéli tapasztalataik és preferenciájuk alapján. A választékkal szembesülve, mondjuk három kávéfajtával, az alanyoknak körülbelül kettő másodpercebe került, hogy megnyomják a választásuk szerinti gombot. Abban a kettő másodpercben azonban izgatott agytevékenység zajlott. 80 ezredmásodpercen belül aktivizálódott a látókéreg; 300 ezredmásodperc alatt a bal inferotemporális kéreg az emlékezet tárhelyévé vált. 500 ezredmásodperc múltán a beszéddel kapcsolatos Broca-terület is bekapcsolódott, amint az alanyok csendben artikulálták a választékot – és 800 ezredmásodperc múltán, mihelyst végleg döntést hoztak, melyik árucikket választják – feltéve, hogy szívesen tették –, az érzelmi

töltetű döntésekkel kapcsolatos jobb koponyafalcsonti kéreg aktivizálódott. Ez a dinamika fényt derít az agy számos területére, amelyek részt vesznek még az epizodikus és szemantikus emlékezet egyszerű eseményében is; még az olyan elsődleges érzékszervi területek is, mint a látókéreg, aktívabbak, amikor az emberek emlékezet-függő feladatokat teljesítenek, mint amikor ugyanazokat a képeket látják, de csak arra kéri őket, hogy kognitív módon hozzanak döntést – például arról, hogy melyik elem a legrövidebb a bemutatottak közül. Ily módon Baddeley működésben lévő emlékezte nem tűnik egy-szerűen egy agyterülethez köthetőnek.

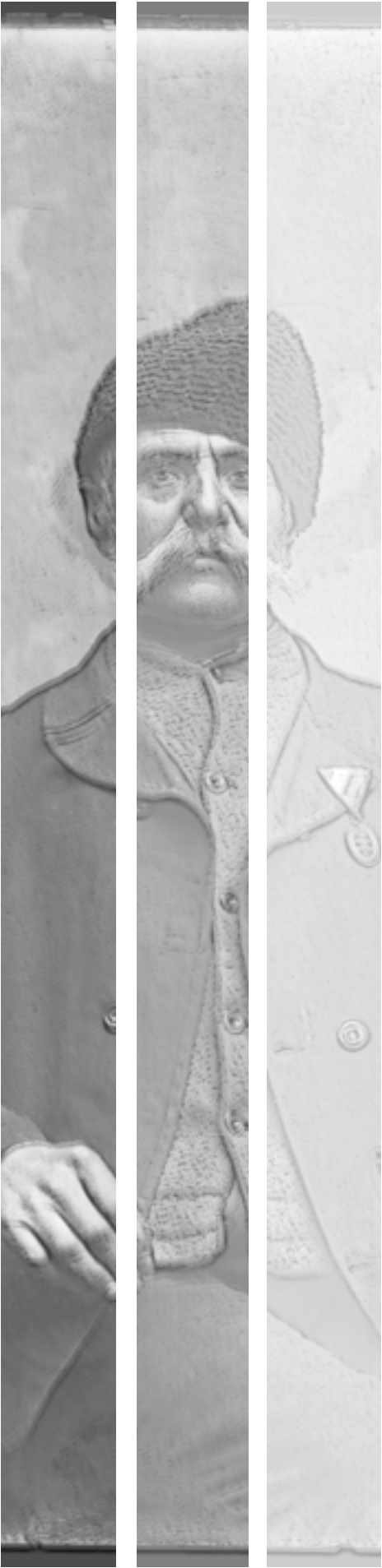
Bármennyire is megvilágító erejük az ilyen kutatások – ugyanakkor még a kezdeti szakaszban tartanak, miközben a technikák és a műszerezettség fejlődik –, korlátozottak az adható választípusok. Ha a tanulás és az emlékezetképzés sejtszintű és molekuláris változásokat igényel, akkor ezek csak állatokon tanulmányozhatók. Ennek kivitelezése megkívánja az állatok tanulási és emlékezési modelljeinek fejlesztését, amelyek bizonyos értelemben helyettesíthetik a nekik megfeleltethető folyamatokat az emberek esetében. Az ilyen megközelítésnek korán utat nyitottak a múlt évszázadban Ivan Pavlov jól ismert kutyakísérletei. Pavlov arra idomította őket, hogy a csengő hangjához társítsák az étel érkezését, és így a nyáleválasztást (a tanult, vagy a szaknyelvben a feltételes reflexet). Az 1930-as években B. F. Skinner egy eltérő tanulási modellt fejlesztett ki (az operáns kondicionálást), amely során az állatoknak egy cselekedetet kellett végrehajtaniuk, például megnyomniuk egy gombot, hogy élelemhez jussanak, vagy hogy elkerüljék az áramütést. Ha egy vagy több próba után az állat viselkedése megfelelően változik – például csengőszóra nyáladzik, vagy jeladásra válaszolva hamarabb nyomja meg a gombot, vagy gyorsabban és kevesebb hibával futja végig az útvesztőt –, elmondható az állatról, hogy tanult a tapasztalatból. Amikor pedig a megtanult feladatot hibátlanul teljesíti, azt mondhatjuk, hogy emlékszik a tapasztaltakra. A kimondatlan feltevés az, hogy bármilyen agybéli folyamatok legyenek is, amelyek részt vesznek az állatok viselkedésében végbemenő ilyen változásokban, azok hasonlítanak azokhoz, amelyek előfordulnak az emberi agyban, amikor tanulunk és emlékezünk. Skinner elgondolása az volt, hogy minden teremtmény ugyanúgy tanul és emlékezik: hogy tudniillik a tanuláshoz szokásos szabályai vannak, amelyek általánosságban alkalmazhatók, mint a gáztörvények vagy a gravitáció a fizikában.

Az ilyen feltevés természetesen problematikus. Hogy mit és miként tanul meg egy állat, az fajfüggő. Egyes táplálékraktározó madarak, például a bozótcsajkók, képesek télvíz idején felidézni azt az ezernyi helyet, ahová elspájzolták az ehető magvakat az előző nyáron. Mások – énekesmadarak, mint a zebra-pintyek – nem képesek megtanulni ilyen feladatokat, de könnyedén

sajátítanak el új dalokat. Egyébiránt egy állat csak úgy képes tudatni egy emberi kísérletezővel, hogy tanul vagy emlékezik, ha változás következik be egy feladata végrehajtásában. „Emlékezhet” korábbi tapasztalatára, de megteheti, hogy nem megfelelően hajtja végre a feladatot – ez volt az egyik szempont az 1950-es években egy híres, a skinneri módszerekkel kapcsolatos bírálatban; ezt a tanulmányt egyszerűen úgy ismerik, hogy „Az állatok helytelenkedése”. A komplex kísérleti összeállításokkal kapcsolatos hősies küzdelmek ellenére a procedurális és a deklaratív tanulás és emlékezet közötti rendszertani különbségek mindig össze fognak keveredni az állatkutatásokban.

Mindazonáltal, ha valamely új tapasztalatból szerzett ismeret az állat viselkedésében következőképpen változást eredményez, amikor új helyzettel találkozik, azt kell feltételeznünk, hogy valami megváltozott az agyában, ami alátámasztja a megváltozott viselkedést. Ezt a bennfoglalt közbülső változót tekintjük az emlékezet „tárolójának”, „nyomának” vagy „emlékképének”, amely akkor alakul ki, amikor a tanulás történik, és akkor aktiválódik újra, amikor az a tanulás később előhívásra kerül. A neurobiológusok így azzal a kihívással találkoztak, hogy azonosítsák a nyom anatómiai, sejtszintű, molekuláris vagy fiziológiai természetét. Az időbeli különbségtétel a rövid és hosszú távú emlékezet között, a bizonyosság, hogy a rövid távú emlékezet labilis és könnyen megszakad, míg a hosszú távú emlékezet viszonylag védettnek tűnik, azt sugallja, hogy ez a különbség az agyon belüli idegkapcsolati minták szerkezeti újramodellezésétől kell, hogy függjön, annak analógiájára, ahogyan a mágneses jelek rögzülnek egy szalagon vagy CD-n, amely később lejátszható, felidézve az eredeti anyagot. A számítógépes „memória” metaforikus erejének csábítása nagyon hatásosan formálta a gondolkodást erről a kérdésről.

A számtalan idegsejt az agyban (százbillió [100×10^{12}] csak az emberi agykéregben) megközelítőleg tízezer-szer több (száztrillió [100×10^{18}]) szinapszis néven ismert kapcsolódási ponton keresztül kommunikál. A szinapszisoknál van, hogy az elektromos jelek, amelyek egy ideg axonján (az idegsejt tengelyfonalán) haladnak, kémiai jelek (neurotranszmitterek, ingerületátvivő anyagok) kibocsátását váltják ki, amelyek az üzenetet egy kis résen keresztül szállítják a szomszédos idegsejthez, válaszreakciót keltve a másik sejtben. A tanulás talán a szinaptikus kapcsolatokban eredményez valamilyen változást, hogy új jeltovábbító útvonalakat hozzon létre? A kanadai pszichológus, Donald Hebb 1948-ban állította fel azt a hipotézist, amely a tudományterület minden későbbi biokémiai és fiziológiai kutatását formálta, tudniillik, hogy a tanulással vele jár a szinaptikus kapcsolódási pontok újraformálása. Saját szavaival (és saját kiemelésével):

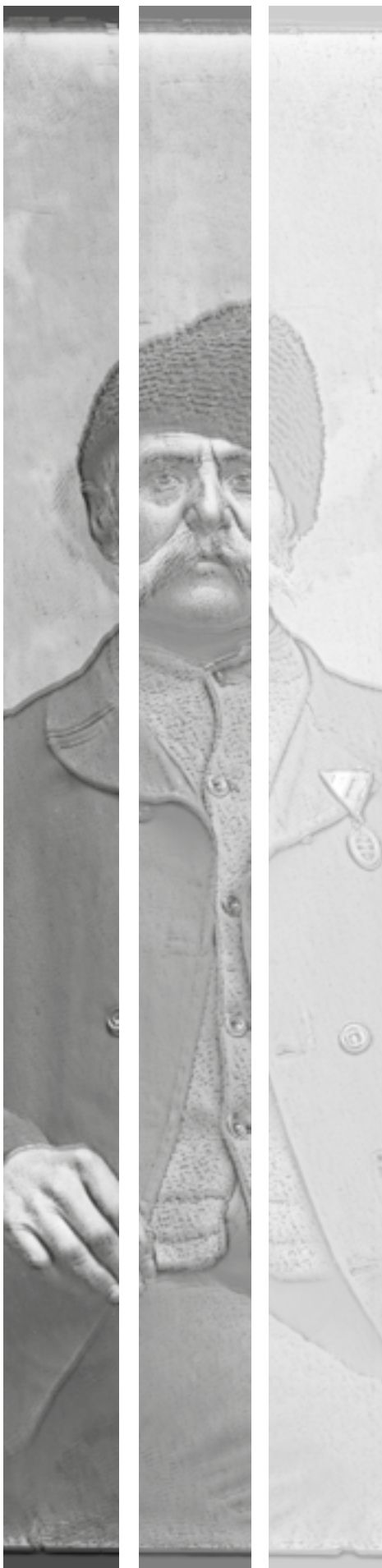


Tételezzük fel tehát, hogy a reverberációs tevékenység (vagy „nyom”) fennállása vagy ismétlődése biztosítja, hogy elkezdődjenek a tartós sejtváltozások, amelyek hozzájárulnak a stabilitásához. A feltevés a kö-vetkezőképpen fogalmazható meg pontosan: ami-kor az A sejt axonja elég közel kerül ahhoz, hogy a B cellára hasson, és ismétlődően vagy kitar-tón részt vesz annak aktiválásában, akkor az egyik vagy mindkét sejtben bizonyos növekedési folyamat vagy metabolikus változás megy végbe, olyan, hogy A hatékonysága, mint egyike a B-t aktivizáló sejtek-nek, megnő.

A legkézenfekvőbb, és azt hiszem, a legeslegvaló-színűbb javaslat azt a módot illetően, ahogy az egyik sejt inkább alkalmassá válik arra, hogy egy mási-kat aktivizáljon, az, hogy a szinaptikus hólya-gok fejlődnek és növelik a kapcsolati területet a szállító axon és az efferens [sejttest] között. Természe-ten nincs közvetlen bizonyítéka annak, hogy ez így van. ... Számos megfontolás van azonban, amelyek a szinaptikus hólyagok növekedését valószínűvé tes-zik.

Az 1960-as évekre a rendszerszemléletű idegtudomány művelői eléggé magabiztossá váltak eljárásaik erőssé-gét illetően, hogy megpróbálják igazolni Hebb feltevé-sét kísérleti úton. A lelkesedés korai fellángolása után azonban a tudományterület polémiába süppedt. Az állí-tások, miszerint patkányok betanítása bizonyos egysz-e-rű feladatok elvégzésére az RNS [ribonukleinsav] és a fehérjeszintézis növekedését eredményezte az agyuk-ban, továbbá, még féktelenebbül, hogy amikor az RNS kivonatot egy recipiens agyába fecskendezték, akkor az emlékezetet is áttelepítették, nagy nyilvánosságot kap-tak, de technikailag hibásak voltak. A kutatási források elapadtak, sőt azt sejtetni, hogy valaki az emlékezet bio-kémiáján dolgozott, némiképpen szégyellnivalóvá vált.

Az 1970-es években több, pácienseken végzett kísérlet kezdte újraéleszteni a bizalmat, és a hebbi valószínűség kézzelfoghatóvá vált. Két eltérő megközelítés segített. Az egyik az emlékezettől nagyon távolesőnek tűnik meg-értésünk számára. Két fiziológus, Tim Bliss és Terje Lomo stimuláló és adatrögzítő elektródákat ültetett egy pat-kány hippocampuszának sejtjeibe, és arra jutottak, hogy ha a sejtekbe elektromos impulzusok sorozatát aktiválták, azok kimeneti tulajdonságai maradandóan módosultak; a sejtek a múltbéli tapasztalatuk „emlékezetét” mutatták. Ez a jelenség, a hosszú távú hatásnövelés, az évtizedek folyamán mechanizmusként és emlékezeti modellként is intenzív kutatás tárgya lett. Körülbelül ugyanebben az időben a pszichiáterből lett idegtudományt művelő szak-ember, Eric Kandel kezdte el kutatni az idegsejtek pszi-chológiai tulajdonságait az óriási tengeri csigában (*Aplysia californica*). Az aplysia kettő hasznos tulajdonság-gal rendelkezik. Az egyik, hogy betanítható egy egysz-e-



rű feladatra, hogy megérintse a lebernyegeit (ahogyan egy szárazföldi csiga összegömbölyödik), válaszként arra, hogy vízugarat bocsátanak a farkára. A másik, hogy sok idegsejtje óriási, és „ugyanaz” a sejt könnyen azonosítható csigáról csigára. Kandel fel tudta térképezni az idegi hálózatot, amely részt vesz a visszahúzóási reflexben, és azonosítani tudott néhány sajátos szinapszist, amelyek elektromos tulajdonságai és biokémiája megváltozott, miközben a csiga tanult. Egyszerűsítő retorikai szóvirággal élve, Kandel „tálcnán kínálta az emlékezetet” a kutatók közösségének.

A következő évtizedek alatt különböző laboratóriumokból, köztük az enyéből is, származó adatok mutatták, hogy valóban, amikor egy állatot – az én esetemben egy csirkét – új feladatra tanítottunk be, a szinaptikus kapcsolódási pontok nagysága és erőssége növekedett bizonyos agyi területeken. Mikroszkóp alatt nézve a kapcsolódási pontok szerkezetileg nagyobbak, és a bennük lévő neurotranszmitterek hatékonysága fokozódik. Kísérleti problémát jelentett bizonyítani, hogy ezek a változások valamilyen módon inkább kapcsolatban álltak a vélelmezett emlékezetnyom tárolásával, semmint a feladat és annak végrehajtása más aspektusainak következményével. Például az általunk alkalmazott feladatban a csirkéknek egy kicsi fényes bogyót kínáltunk. Pár másodpercen belül az észlelés után szinte kivétel nélkül megpiszkálták csőrükkel az ilyen bogyót. Ha a bogyó kellemetlen ízű (mivel egy elég keservesen curry ízű folyadékba mártottuk), a csirke egyszer piszkálja meg, majd erőteljes fejrázással fejezi ki nemtetszését, és csőrét a ketrec aljához dörzsölve megtörli. Ha a következőkben – bár hányszor több napon át – hasonló, ám száraz bogyót kap, a csirke nem piszkálja meg, hanem eltávolodik, megismételve néhányszor a korábbi fejrázás és csörtörlés koreográfiáját. Arra következtetünk, hogy a csirke egy tapasztalatszerzés után megtanulta, hogy az ilyen színű, formájú és méretű bogyó kellemetlen ízű – legalábbis az adott összefüggésben –, és hogy amikor a bogyót újra megkapja, ez az emlék újraaktivizálódik. A beavatottak számára ez az egyszeri passzív elkerülő tanulás néven ismert jelenség.

A passzív elkerülő feladat számos kísérleti előnnyel jár. Gyors és reprodukálható, a csirke viselkedési fejlődésének normális aspektusán alapszik – azaz spontán módon fedezi fel környezetét a kis tárgyak megpiszkálásával. Mivel a kiképzés – a bogyó megpiszkálása – csak pár másodpercet vesz igénybe, a keserű íz azonnali folyamányai rögtön különválaszthatók a rövid és hosszú távú emlékezet közötti átmenet során bekövetkező események áradatától. Az előnyök nekik megfelelő hátrányokkal járnak. Amit ilyen fiatal állatok esetében, amelyeknek az agya gyorsan fejlődik, a tanulásról felismerünk, releváns-e a felnőttkori tanulással kapcsolatban? Vajon a molekuláris történések, amelyek akkor mennek végbe, amikor a csirke valamiképpen egyszeri próba alapján tanul a bogyó piszkálásából, megfelelnek-e azok-

nak, amelyek a patkány esetében mennek végbe – a számára szükséges több próbálkozás alkalmával, hogy megtanuljon egy útvesztőn végigszaladni –, és amelyek még így is elmaradnak azoktól, melyek akkor zajlanak le, amikor egy gyermek a hét napjait tanulja meg, vagy azt, hogy mit remélhet a születésnapjára?

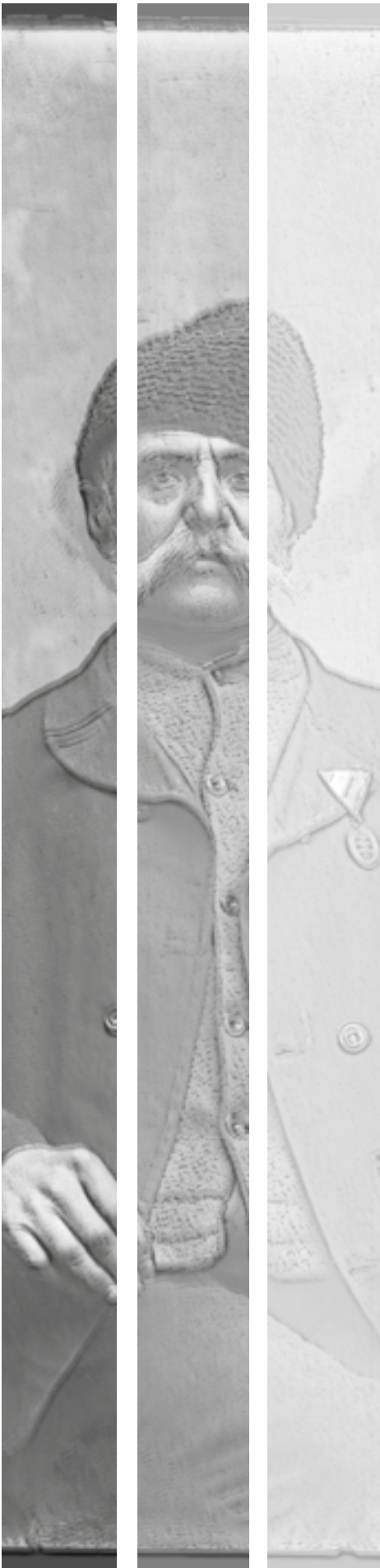
Még ha félretesszük is ezeket az aggályos kérdéseket, biztosak lehetünk-e afelől, akár csak a csirke esetében is, hogy a szinapszisokban felismert változás igazából az emlékezésnyom valamilyen megnyilvánulása? Azaz, hogy ez szükségszerű, elégséges és kizárólagos változás-e az agyban, amely valamiképpen „reprezentálja” az emlékezetet, képessé téve azt a későbbi felidézésre? A változás nem egyszerűen a kezdeti tapasztalat valamely aspektusának, mint például a bogyó színének vagy látványának, vagy a piszkálás motorikus aktivitása megtanulásának eredményeként fordulhatott-e elő? Vagy, mivel nem tudhatjuk, vajon a csirke tesztelés nélkül tanulta-e meg a feladatot, lehet, hogy ez a felidézés élményének a következménye, semmint magáé a tanulása? Nem kívánom itt újrakezdeni a kontrollkísérletek évtizednyi sorozatát, amely képessé tett bennünket arra, hogy különbséget tegyünk az általános tapasztalat okozta és a tanulás okozta változások között. Ezek hosszas tárgyalását közreadtam a *The Making of Memory* (Az emlékezet élete) című könyvemben. Mindazonáltal a pusztán technikai érdeklődésnél többre tarthat számot az alkalmazható megközelítési módok felvázolása.

Nagyjából kétféleképpen közelíthetünk a molekuláris folyamatok azonosításához, amelyek a perctől órákig terjedő időközben következnek be az egyszerű feladatra, például a passzív elkerülésre történő képzés után, és amelyek feltehetően szükségesek a rövid távú emlékezet fenntartásához és a hosszú távú emlékezethez történő átmenet megerősítéséhez, amit az emlékezet megerősítése folyamatának neveznek. Megtaníthatjuk az állatot a feladatra, és kereshetjük a változásokat valamely vélelmezett biokémiai mérés alapján – ez lehet egy enzim aktivitása, egy molekulaszintézis koncentrációja vagy aránya. Vagy megkísérelhetjük megszakítani a megerősítés folyamatát egy gátlószer alkalmazásával – ez lehet gyógyszer vagy antimetabolit, amelyről tudott, hogy blokkol egy bizonyos biokémiai folyamatot, amelyről azt hisszük, hogy szükséges a megerősítéshez. Ha a gyógyszer blokkol egy ilyen folyamatot, akkor az állatnak következésképpen nem lenne szabad felidéznie a feladatot; azaz sajátos amnéziát kellene tanúsítania. A gyanított biokémiai mérés időben elhúzódó változásainak, vagy az alkalmazott és amnéziát okozó szer hatása időtartamának megfigyelése lehetővé teszi a képzést követő órák alatt lezajló molekuláris történések – egy biokémiai áradat – idősorának feltérképezését, amely a szinaptikus erők maradandó változásában tűnik elérni csúcspontját. Az 1980-as évek óta mindkét módszert egymás utáni sorrendben alkalmaztam, hogy megértsem a csirkékben lezajló eseményáradatot.

A képzési tapasztalatszerzés elindítását követő percekben változás következik be a neurotranszmitterek kibocsátásában, bizonyos agyterületek szinapszisaiban. A posztszinaptikus idegsejt működésének aktivizálásával egyidejűleg jelentkező növekedések a sejt biokémiai aktivitásának hullámát is serkentik, amely kellő időben a fehérjék egy családjának szintézisét eredményezi, amelyeket sejtadhéziós molekuláknak neveznek, és a sorsuk az, hogy átkerüljenek a szinapszisokba. A sejtadhéziós molekulák valamelyest a tépőzárhoz hasonlítanak. A sejt membránjában helyezkednek el, például a szinapszisznál, egyik vége (a tépőzár vége) kiáll a két idegsejt közötti térbe, összetartva a két – pre- és posztszinaptikus – oldalt. Az újonnan szintetizált adhéziós molekulák, amelyek a képzési tapasztalatszerzés eredményeként keletkeztek, elkerülnek az aktivizált szinapszisokhoz (ez a folyamat eltart mintegy 4–6 óráig a csirkék és a patkányok esetében), és beépülnek a membránjaikba, megváltoztatva a kötési pontok erejét a szinapszis két oldala között. Ez mintha pontosan megerősítené Hebb hipotézisét arról, hogy az emlékezet miként kódolható és tárolható az agyban.

A kitűnő Nobel-díjas biokémikus, Hans Krebs, akinek oxfordi laboratóriumában töltöttem a doktori fokozat megszerzése utáni időm egy részét az 1960-as évek elején, egyszer azt mondta nekem, hogy minden egyes biológiai probléma tekintetében az Úristen kiválasztott egy megfelelő magasabb rendű szervezetet, amelyben meg lehet birkózni a problémával. Bizonyítottam, hogy az emlékezet formálásában részes molekuláris folyamatok kutatása tekintetében a csirke valóban Isten magasabb rendű szervezete. Mások eltérő döntést hoztak, a választék a muslicáktól és a tengeri csigáktól a közismertebb laboratóriumi patkányokig és egerekig terjed. 2001-ben a Nobel-Bizottság a csiga mellett döntött – bár a díjazott, Eric Kandel laudációja nem annyira a csigák (*Aplysia californica*) emlékezetét kutató munkájáról, mint inkább a neurotranszmitterek tanulmányozásában végzett kutatásairól szólt. Ami érdekes és bátorító, az az, hogy a különbségek és a tanulási paradigmák ellenére az derült ki, hogy ezeknek az eltérő fajoknak az agyában vagy idegrendszerében nagyjából hasonló molekuláris folyamatok sorozata zajlik a képzési tapasztalatszerzés során és azt követően.

Tehát következtethetünk-e arra, hogy megtaláltuk az emléknymot – vagy legalább azonosítottuk a folyamatokat, amelyek által az emléknymok létrejönnek? A felvetés, hogy az emlékek a megváltozott szinaptikus kapcsolódási pontok értelmében válnak kódoltá, minden bizonnyal megnyerő a kutatók új generációja számára, akik magukat a rendszerszemléletű idegtudomány számítógépes művelőinek nevezik, és érdeklődésük arra irányul, hogy matematikai és számítógépes modellek felállításával értelmezzék, hogyan jöhet létre a tanulás egy megosztott és a szinapszi-

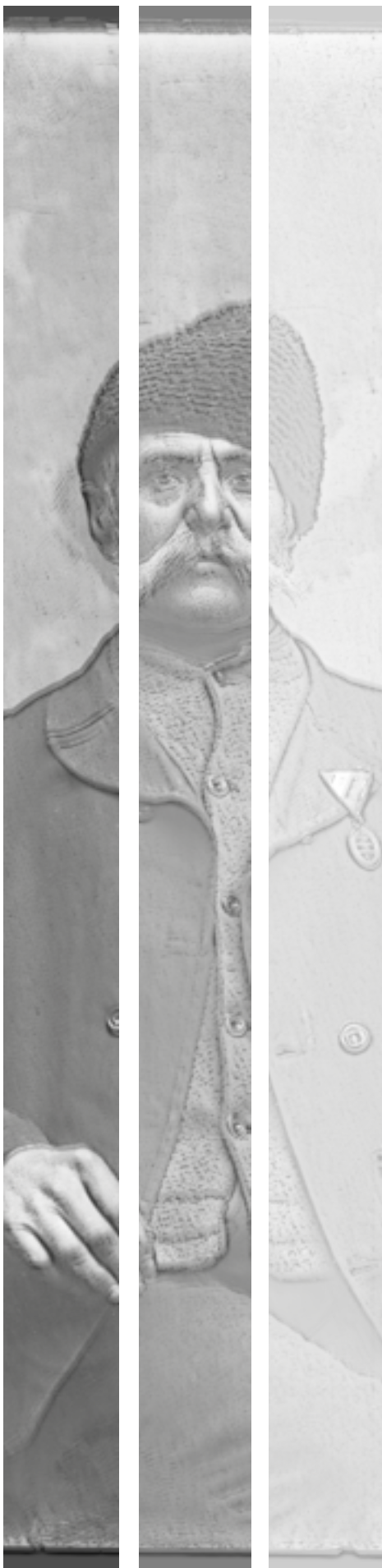


sok kapcsolódásával összekötött ideghálózatban. Egy ilyen elméleti hálózatban minden egyes emléket (vagy társítást) a szinapszisok sajátos együttesének aktivitása képvisel, egy egyedi minta, de bármely szinapszis bevonható több különböző ilyenfajta társításba. Ezen az alapon, és megbecsülve a bennfoglalt szinapszisok számát, Edmund Rolls kiszámította, hogy a hippokampusz mintegy 36 500 emléket tárolhat.

Egy ilyenfajta számítás azonban egy sor előzetes feltevésen alapul: hogy a biológiai emlékek lebonthatók izolált monászokra, továbbá bitek és bájtok értelmében mérhetőek, amellyel a számítógépes emberek számolják gépeik erejét. Ez az, ami oly valószínűtlen; hány bit információt igényel a Szent Agoston által felsorolt emlékek változatossága? Ami azt illeti, hány bit információra van szüksége a csirkéimnek, hogy emlékezzenek és kerüljék a kicsi piros bogycsók piszkálását, de tudják, hogy biztonságban piszkálhatják a sárgákat? A csirke a keserű bogycsók piszkálásának tapasztalatát a bogycsóka színe, formája és mérete szerint csoportosítja, abban az összefüggésben, amikor piszkálta, más bogycsók piszkálásának múltbéli tapasztalata függvényében, és talán még sok más szempontot érvényesítve, amelyek közül bármelyik meghatározhatja kialakult viselkedését. Távolról sem vagyok biztos abban, hogy a csirke esetében ez a komplex jelentéseggyüttes, amelybe a bogycsóka bármely későbbi látványa és a rá adott válasz ágyazódik, egyszerűen lebontható lenne az informatikaelmélet bitjeire.

Valóban, ezt az elméleti vonatkozást hamar megerősíti a kísérlet. Az a lineáris eseménysor, amelyet a biokémiai és farmakológiai kísérletek demonstrálnak, kezdve a neurotranszmitterek kibocsátásának múló változásától a szinapszis látszólag maradandó szerkezeti változásáig, nem nyert hamarabb megerősítést, mint ahogy az adatokban a paradoxonok kezdtek megjelenni. Az emlékezetnyomok, amelyek látszólag erősen kötődtek egy agyterülethez, úgy tűnik, hogy a következő órák és napok során átvándorolnak máshova – amint ez feltételezhető volt HM tapasztalata alapján. Az ő hippokampuszbeli károsodása nem törölt régi emlékeket, csak megakadályozta az újak kialakulását. Ráadásul „az emlékezet” nem egyetlen helyet foglal el, mintha azt egy diszkrét entitás alkotná. A MEG-kísérlet, amelyre fentebb hivatkoztam, rámutat, hogy sok agyterület vesz részt valamely korábbi tapasztalat felidézésének és megválaszolásának dinamikus folyamatában. Még a csirkéim esetében is kimutathattuk, hogy a keserű bogycsóka emlékének különböző aspektusai is – a színe, formája, mérete – az agy eltérő területein eloszló idegsejtek és szinapszisok különböző együtteseit veszik igénybe.

Továbbá az emlékezet többet foglal magában, nem csak szinapszisokat vagy csak agyakat. Hogy egy ember vagy egy csirke mennyire jól tanul vagy emlékezik, a



testi állapot sok más aspektusától is függ. Az éberség és figyelem fiziológiai folyamatoktól függ, például a véráramlástól és a hormonszinttől. Az emlékezettel együtt jár az érzelem és az értelem, valamint az agyon kívül termelt hormonok, jelesül az adrenalin és ennek neurotranszmitter rokona, a noradrenalin, amelyek részt vesznek annak meghatározásában, hogy mire emlékezünk. Amikor a csirkék egy keserű bogyót piszkálnak, bőven áramlik szteroid (kortikoszteron, a csirkében az emberi kortizol megfelelője) a vérkeringésbe. Ha túl kevés vagy túl sok a kortikoszteron, a csirke nem fog emlékezni a tapasztalatra, és piszkálni fogja a keserű bogyót a későbbi próba alkalmával. Ebben az értelemben a tanulás és az emlékezés – az emlékezet – nem egyes szinapszisok, vagy idegsejtek, vagy agyak tulajdonsága, hanem az egész magasabb rendű szervezeté, a személyé.

És még ez sem a minden. Hebb modellje a tanulásról szól: mi történik, amikor egy állat vagy egy ember új tapasztalatot rögzít. Bennfoglaltan szerepel benne a felidézés elmélete is: tudniillik, hogy emlékezni egy tapasztalatra magában foglalja a tanulás által generált új folyamatok reaktiválását. Az emlékek tárolása egy számítógép fájljaihoz hasonlít, és az emlékezés látszólag nem lenne több, mint ezeknek a fájloknak a mély tárolóból történő előhívása és újranyitása. De ez a mechanikus modell nem működik. Minden egyes előhívás önmagában is új tapasztalat. Az emlékek reaktiválása árnyaltan változik minden előhívás alkalmával. Tantermi kísérletek gyönyörűen illusztrálják, hogy tudjuk, miről van szó. A *Challenger* amerikai űrsiklót és az űrhajósait elpusztító szerencsétlenség utóhatása közepette pszichológia szakos hallgatók egy csoportját arra biztatták, hogy írják le, miként emlékeznek az eseményre. A feljegyzéseket megőrizték, és egy év múlva megkérték őket, hogy újra írják le beszámolójukat. Az első és a második beszámoló közötti jelentős eltérés azt jelezte, mi-lyen ingadozó még a drámai eseményekre vonatkozó emlékezetünk is. Amúltörzésekoránszem passzív, emlékeinkben aktívan rekonstruáljuk azt.

A legutóbbi időkben a neurobiológia elkezdte behozni lemaradását az általános tapasztalat és a pszichológusok tekintetében. Sok laboratórium, köztük a miénk is, rámutatott, hogy amikor egy állat egy korábban szerzett tapasztalatra vonatkozó emlékeztetőt kap, az emlékezet újra elbizonytalanodik, és jobban megzavarható gyógyszerekkel és biokémiai gátló eszközökkel, mint a kezdeti megerősítés idején. Egyes kutatók úgy kezdtek beszélni erről, mint „újra történő megerősítésről”. Az újra történő megerősítés dinamikája azonban erősebben különbözik a megerősítés idején érvényesülő dinamikához képest; eltérő agyterületek vesznek részt benne, és a biokémiai változások sem pontosan ismétlik meg a megerősítéskor fellépő változásokat.

Természetes, hogy egy múltbéli élményre történő emlékeztetés maga is új élmény lehet bizonyos mértékig. Nem lépünk kétszer ugyanabba a folyóba, és az emlékezet a történelemtől függ. Az, hogy a neurobiológusok csak az utóbbi időben vették ezt tudomásul, azt mutatja, hogy milyen szemellenzősnek és szűklátókörűnek bizonyult az ő paradigmájuk – azaz hogy a miénk. Csapdába ejtett bennünket az egyszerű és megismételhető kísérletek igénye, hogy működőképes, használható meghatározást adjunk arra vonatkozóan, hogy mi a „tanulás”, mi az „emlékezet” és így tovább, mintha ezek a komplex folyamatok skatulyázhatók lennének elszigetelve minden mástól, ami egy élő, viselkedést mutató, tanulást végző és emlékező lényben végbe megy létezése minden egyes momentumában. Kísérleteink csak egy kis töredékét ragadják meg ennek a komplexitásnak, és hibát követünk el, ha összetévesztjük a töredéket a teljességgel.

Fél évszázada a rendszerszemléletű idegtudomány úgy látta az agyat, hogy az diszkrét központokból áll, a látásért, hallásért, fájdalomért, emlékezetért, és sok minden másért felelős területekből. Mindezek fölé s különböző területek fölé helyezve volt egy szuper-koordináló központ, az asszociációs agykéreg. A különálló területek ide, ennek a koordinátornak küldték fel a jelentéseiket, itt kerültek ezek összesítésre, és ez utasította az agy motorikus területeit, miként reagáljanak. Ez a fejben lévő homunkulus volt az önazonosság, az egyéniség, az „Én” forrása – pár centiméterrel a szemünk mögött.

Minő egyszerűség azonban: nincs ilyen emberke. Aho-
gyan, azt hiszem, Gertrude Stein beszélt Los Angeles belvárosáról: ott nincs ott.³ Az agynak nincs központi processzora, egy mindent kontrolláló szuper menedzsere. Inkább sejtegyüttesek megosztott, ám gazdag kapcsolatrendszerrel összekötött hálózatairól beszélhetnénk, amelyek egymás között egy koherens élmény illúzióját keltik, amelyben mindannyian osztozunk normálisan működő pillanatainkban. Az emlékezet rejtélye, miként az agyi folyamatok oly sok vetülete is, úgy tűnik, az, hogy egyszerre helyhez kötött és helytelenül kötetlen. Az emlékezés egyszerre biztos és határozott, mint amikor felidézzük a hét napjainak a nevét, vagy mint amikor sok év után újra kerékpár nyergébe szállunk és biciklizni kezdünk, ugyanakkor tünékeny és csalóka, mint egy szappanbuborék, mint amikor megpróbálunk visszaemlékezni az első pillanatra, amikor megpillantottuk szerelmünket, és emlékünket összehasonlítjuk az övével.

Fanny Price-nak minden bizonnyal igaza volt. Ezért nekünk, az emlékezetet kutató neurobiológusoknak időről időre ki kell jönnünk laboratóriumunkból, reflek-

3 Steven Rose csalatkozik emlékezetében. Gertrude Stein a California állambeli Oakland városára, nevelkedésének helyszínére emlékezik vissza. (Gertrude Stein: *Everybody's Autobiography*. New York: Random House, 1937, 289. TPB)

tálnunk kell különféle procedurális, deklaratív, epizodikus és önéletrajzi emlékeinkre, és figyelniük kell azoknak a filozófusoknak, költőknek és regényíróknak a munkájára, akik még a legzseniálisabb kísérletezőnél is gazdagabban és jelentőségteljesebben tudják megvilágítani és értelmezni élményeinket.

Tóta Péter Benedek fordítása

Forrás:

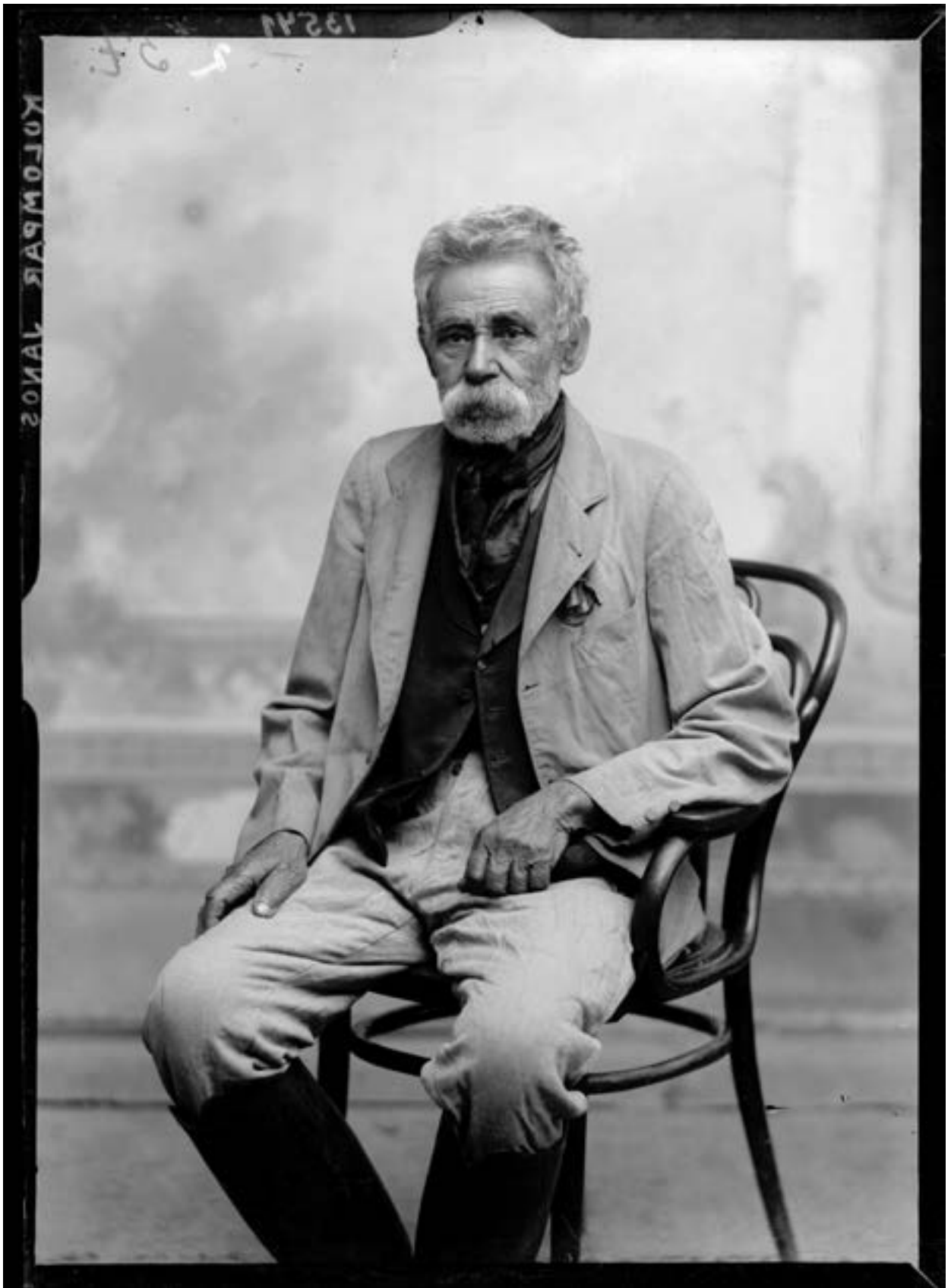
Steven Rose: *Memories Are Made of This*. In: Harriet Harvey Wood – A. S. Byatt (szerk.): *Memory. An Anthology*. Vintage Books, Random House London, 2009, 54–67



Farkas Józseftizedes (1829–1918) csizmadia



Ismeretlen



Kolompár János (1831–1913) vasmunkás