

ÚJ ÁLLÁSPONTOK A TUDAT ÉRTELMEZÉSÉBEN

Az utóbbi években szaporodni látszik az emberi agyműködést, tudatműködést, lelki funkciókat értelmező publikációk száma. E széles kutatási terület interdisciplináris jellegét tanúsítja, hogy az 1978. évi Filozófiai Világkongresszus is külön szekcióülést szentelt neki. Összeállításunk természetesen nem törekedhet a problémakör teljességének bemutatására, de talán a három magyar állásfoglalás is jól szemlélteti a megközelítések változatosságát, a kutatások forrongását — ami már önmagában is közeli szintézist sejtet.

Szentágotthai János

EGYSÉGES AGYELMÉLET: UTÓPIA VAGY REALITÁS?

E cikkem 1977 decemberében Budapesten azonos címen tartott Semmelweis emlékelőadásom és az 1978 augusztusában Düsseldorfban lezajlott Filozófiai Világkongresszuson tartott előadásom gondolatmenetét követi, remélhetőleg szélesebb olvasótábor számára érthető kifejtésben. Valamivel részletesebben kell itt kitérnem a kérdés információ- és rendszerszemléleti aspektusaira.

Az utóbbi negyedszázad tudományos fejlődése azelőtt nem sejtett mértékben szélesítette ki ismereteinket az idegi működésekről, ugyanakkor azonban egy sajátságos, valójában régi ellentmondást is nagy mértékben kiélezett. Az idegfiziológiai, ideganatómiai, idegbiokémiai és idegrendszeri farmakológiai kutatások nyomán bámulatos mélységig tudtuk felderíteni az egyes idegelemekben lezajló ingerületi folyamat lényegét, az idegelemek közötti kapcsolatokban lezajló izgalmi vagy gátló működések anyagcserefolyamatait, az ingerületátvitel kémiai vagy elektromos jellegű mechanizmusait, különböző idegelémelek rendkívül eltérő specifikus anyagcseretulajdonságait, ezek mester-séges vagy a szervezet anyagcsereje során keletkezett molekulák útján való befolyásolását (ami egymagában már ma is óriási és a jövőben még fokozódó jelentőségű új orvoslási ág, a pszicho-neuro-farmakológiai kifejlődéséhez vezetett), és végül az érzékszervek által szerzett információ feldolgozásába azelőtt nem sejthető betekintést nyújtott. E, szorosabb értelemben a *neurobiológia* tárgyköréhez tartozó fejlődéssel párhuzamosan a modern experimentális pszichológia (pszicho-fiziológia) és még sokkal inkább az etológia, azaz az állatok magatartásának szabad körülmények mellett, mégis egzakt eszközökkel folytatott elemzése, sőt ezen túlmenve a magatartás-genetika is óriási új tényanyag birtokába juttatott bennünket. — Ellentétben azzal a naiv elvárásunkkal, hogy az idegrendszer egyrészről elemi, másrészről globális működéseinek (durva egyszerűsítéssel a magasabb idegműködéseket így jelölém)

pontosabb megismerésével egyben automatikusan a kettő között bizonyos szintézis is keletkezzék; ami történt ennek pontosan az ellenkezője. A két irány minél tovább halad, annál jobban divergál, és ahol kapcsolatokat véltünk látni, azok megengedhetetlen leegyszerűsítések, vulgáris analógiák, cirkuláris okfejtés stb. eredményeként lepleződnek le.

Valószínűleg ez az ellentét az oka az agy-tudatelméletek hirtelen megszaporodásának, amelyek a világ neurobiológiai, pszichológiai és filozófiai irodalmát szinte elárasztják. Az előző szakasz végén jelzett dilemmában a szerzők többsége két tradicionális alternatív véglet közt válogat: egyik lényegében reduktivista, azaz mechanikus materialista magyarázat; a másik véglet pedig visszatérés a karteziánus dualizmusra. Természetesen mai ismereteink háttérével ezt az elméletek képviselői egyenesen nem ismerhetik be, hanem — sok esetben talán szubjektíve jogosan — úgy vélik, hogy elméletük az agy-elmélet ma színterének megfelelő, lényegében új kifejtése. (Az egyszerűség kedvéért így fordítjuk az angol nyelvhasználatban ma már általános *brain* — [a neurobiológia eszközeivel vizsgálható konkrét központi idegrendszer = agy] — *mind* [a pszichológia-etológia eszközeivel vizsgálható magasabb idegi működések, magyarul jobb híján = *elme*] fogalompárost.) A neurobiológia aktív művelői a nyugati országokban többségükben a *Feigl* (1958) által kifejlesztett „psychoneuralis identitásban” látják a probléma megoldását, azaz némi egyszerűsítéssel: a pszichikus jelenségek lényegében azonosak az agy fiziológiai működéseivel, ezeknek csupán más aspektusát képezik. A másik tábor vezetői *Popper* és *Eccles* (legjellegzetesebb és legrészletesebb kifejtése *P és E: The Self and its brain*, Springer, 1977), akik a Popper-féle „három világ” (ti. (1) az anyagi világ, (2) az érzések és tudatok világa és (3) az absztrakt konstrukciók világa) elképzelés keretében nyíltan dualista módon képzik el az agy-elmélet viszonyát, amely kettő egymással állandó kölcsönhatásban működik („dualist interactionalist theory”). A kölcsönhatás helyéül *Eccles* az agykéreg elsősorban általam javasolt ún. moduljait jelöli meg (ezekről alább; és egyben ezért is kell némi idegenkedéssel és ambivalenciával ti. a filozófiai gondolkodási készségem határait figyelembe véve a vitában ily részletesen állást foglalnom). Habár mindkét tábor képviselői hangsúlyozzák egyrészt az elméleteiknek a reduktivista, másrészt a karteziánus állásponttól való eltéréseit, ezek az eltérések a valóságban nagyobbára szemantikus jellegűek, és az elméletek eredeti formában való kialakulása idején rendelkezésre álló és a mai ismereti háttér különbözőségeiben rejlenek. A szovjet agykutatók álláspontját leszögező *P. K. Anohin* fogalmazása szerint az idegi organizáció lényegét kizárólag a dialektikus materializmus filozófiai módszerével, valamint a rendszerelemzés és kibernetika elméleti eszközeivel lehet megközelíteni. Újabb konkrét agy-elmélet megfogalmazása helyett a *Pavlov* által teremtett szemléleti háttér — a feltételes reflex elméletnek, amely magának a klasszikus reflex-elméleteknek lényeges kiterjesztése — továbbfejlesztésében látják a megoldást.

Valamelyes új szint jelent a régi monista-dualista¹ ellentétben *Mario Bunge* kanadai filozófus „*emergentist-materialist*”-nak jelölt elmélete (ld. „Emergence

¹ Bunge nagyon szellemesen foglalja össze a „psychoneuralis” elméletek öt monista (M) változatát: M₁ fenomenalizmus (abszolút idealizmus, = pszichikus az egyetlen létező valóság); M₂ neutralis monizmus (pl. *Feigl* elmélete); M₃ eliminatív materializmus (pszichikus nincs); M₄ = reduktív materializmus; M₅ = „emergent” materializmus (MB elmélete) és dualista (D) változatokat: D₁ fiziológiai és pszichológiai egymástól

and the Mind”: Neuroscience, 1977, 2, 501—509. és Bunge - Llinás, 16. Filozófiai Világkongresszus, 1978, Düsseldorf: Szekcióelőadások kötet). Az „emergence” szó (valami újszerű keletkezése a „resultant = eredő” kifejezéssel szemben) lényegében a dialektikus materializmusban régen megfogalmazott ama tétel újrafogalmazása, hogy az egész nem egyszerűen a részek összege, hanem a mennyiség bizonyos ponton minőségi változásba csap át. Ennek ellenére Bunge csak úgy, mint a nem nyíltan dualista elméletek megalkotóinak többsége, nem képes megbirkózni azzal a bevezetőben említett szélesebb „psycho-neuralis divergencián” belüli külön dilemmával, hogy miképpen képzelhető el az „emergent” **mind** (elme) visszahatása a konkrétan létező és működő **brain-re** (agy). Bunge elmélete, az „emergent psychoneural monism” három alappozitívumát közlül az alábbi kettővel könnyű egyetérteni:

(i) Minden mentális állapot esemény és folyamat a központi idegrendszer (leszűkítve a gerincesekére) állapota, eseménye és folyamata.

(ii) Ezek az állapotok, események és folyamatok „emergent”-ek (= minőségi ugrások) a központi idegrendszer sejtjes elemei (működésé)-hez viszonyítva.

Ezzel szemben a harmadik posztulátum triviális és/vagy semmitmondó (és egyben mutatja, hogy az elmélet a fentebb megfogalmazott alapkérdéssel nem hogy megbirkózni, de azt még megfogalmazni sem képes):

(iii) az úgynevezett pszicho-fizikális relációk a központi idegrendszer különböző részei, illetve az idegrendszer és a szervezet egyéb részei közötti kölcsönhatások.

Ez a fogalmazás rögtön leleplezi, hogy az „emergent” képzet ugyan más, filozófikusabb ízű, szavakban körülírja azt, amit úgyis régóta tudunk: a pszichikus több (értsd az anyag mozgásának magasabb szintje) mint a mentális, de semmit sem tud kimondani arról, hogy mi lehet a kauzális lánc a magasabb pszichikus (mind = elme) szint felől az alacsonyabb neuralis (brain = agy) szint irányában. Olyan elmélet, amely nem tesz legalább kísérletet ennek magyarázatára, eleve nem tekinthető tudományos agyelméletnek. Az mármint a kérdés: át kell-e engednünk a teret a dualista elméleteknek, amelyek számára ez a dilemma nem létezik? A legtöbb dualista elmélet, főleg az idegrendszerre vonatkozó ismereteket legjobban magába olvasztó Popper—Eccles elmélet per definitionem felveszi a *brain* és *mind* külön létező voltát és mindkét irányú kölcsönhatásukat, tehát magából a monista elméletek alapdilemmájából indul ki; egészében azon épül fel. Ennek az egész cikknek fő célja annak bemutatása, hogy a nyílt reduktivistáktól, Feigl-en keresztül Bunge-ig összefoglalható (lényegében monista) szemléletek egyrésztől és a dualista szemléletek másrésztől hamis alternatívába csalják be gondolkozásunkat. A kérdés valódi nyitja az, hogy mindezek az elméletek az idegrendszer egy régi, ma már meghaladott szemléletén nyugszanak.

független létezők, D_2 = psychoneuralis parallelizmus, D_3 = fiziológiai epiphenomenalis mus (= a pszichikus csak a fiziológiai tünete) D_4 mentalizmus (= a pszichikus kontrollálja a fiziológiáit), D_5 = interkacionalizmus (= a pszichikus és fiziológiai egymással kölcsönhatásban vannak = Popper-Eccles elmélete). A helyzet tehát elég bonyolult: monista elmélet lehet idealista, sőt annak extrém formája.

Az agy-elve probléma információ-szemlélet alapján való megközelítése

Ilyen megközelítés egyes elemeit, mint említettük már, P. K. Anohin gondolkodásában megtaláljuk, kísérletekben és sejtésszerűen már a késői harmincas évektől kezdődően. Már tudatosan és információelméleti, illetve kibernetikai szemlélet birtokában közelíti meg a problémát, az ötvenes évek legelejétől kezdve *D. M. MacKay* (Brit. Journ. Philos. Sci., pp. 105–121; 352–353, 1951–1952). Eleinte, részben *Neumann János* eredeti gondolatmenete nyomán, a kérdést úgy veti fel, hogy mik lennének az elvi követelményei értelmes döntésre, a múlt hibás döntéseiből való tanulásra és a jövőben leendő (addig elő nem fordult) feltételek közötti helyes mérlegelésre is képes *műtárgy* (artefact)-nak. Egyben a műtárgy elé még azt a feltételt is szabja, hogy saját működési állapotát legyen képes észlelni és mérlegelni. Popper-ral ellentétben, aki ez utóbbi képességet műtárgytól eleve tagadja, MacKay ennek lehetőségét elvileg megengedi, bár beismeri, hogy ennek műszaki megvalósítása még igen távoli jövőben is irreális célkitűzés. MacKay gondolatmenetének kulcs-pontja, hogy ilyen értelmes „műtárgy”-nak:

1. magában kell foglalnia a külvilág „modell”² alakjában való reprezentációját.

2. A külvilág tárgyai és eseményei a műtárgyban olyan „jel-minták” (signal patterns) által vannak reprezentálva, amelyek e tárgyak és események újólagos — és esetleg változó formában való — észlelésére alkalmazkodás jellegű (adaptív) válaszokat képesek létrehozni. Továbbmenve a műtárgy a külvilágról akkor nyer új információt (a tanulás analógja), amikor arról alkotott belső modelljét módosítja: mintegy „naprakész” állapotra hozza.

3. Az „előrelátás” (döntések mérlegelésekor) analógja az lenne, hogy a műtárgy a külvilág modelljét a valóságos időnél gyorsabban hajtja és ezért a jövőben bekövetkező alternatívákat mérlegelheti, tehát közülük választhat.

4. Tudat (awareness) és öntudat (self-awareness) a műtárgy oly működésével lenne analógiába hozható, ha ez hierarchikusan organizált olyan belső információs rendszerrel rendelkezne, amely révén az egymással összefüggő részek kölcsönösen tartalmazzák egymás modelljeit és azokat ugyanúgy kezelnek mint a külvilág modelljeit az előző 1–3. pontok szerint.

E követelmények így túlságosan elvontnak tűnhetnek de érdemes figyelnünk arra, hogy MacKay e gondolatai az 1950-es évek elejéről származnak, és hogy mind a négy fentebb kiemelt kulcs gondolat a modern agy-elve elméletek szinte mindegyikében (az 1. és 2. Edelman [1978]; a 4. M. Bunge [1977] gondolatmenetében [rosszul]) nem sokkal konkrétábban, és természetesen MacKay-ra való hivatkozás nélkül, újra felbukkan.

MacKay az 1960-as évek közepétől újra visszatér (*MacKay*, 1966, *Brain and Conscious Experience*; Springer, New York 422–445. l.) erre a gondolatmenetre, de most már kevésbé a mesterséges intelligencia (azóta az elméleti vonal képviselői szemében meglehetősen leértékelődött) problémakörében, hanem sokkal inkább az *agy-elve* páros (kvázi-)filozófiai megközelítésben. Ő ismeri fel és mondja ki először — sajnos még kissé metaforikus formában — azt a tényt, hogy a hagyományos agyelméletek elmennek a kérdés episzte-

² A képzet a valóságban nem MacKay-tól, hanem eredetileg Craik-tól (1943) származik.

mológiai fő buktatója, az *információ* és ennek *anyagi hordozója* közötti viszony alapkérdése mellett.³

Ezt sokkal szókimondóbban fejti ki *D. J. Dubrovskij* moszkvai filozófus (1978; 16. Nemzetk. Filoz. Kongr. Szekcióelőadások Köt. 205–208. l.). Már kérdésfeltevése is rendkívül provokatív:

a) Hogyan lehet azonosítani elméleti (mentális) jelenségeket, amelyek nem rendelkeznek térbeli jellemzőkkel (space characteristics), agyi folyamatokkal amelyek ilyenekkel rendelkeznek?

b) Hogyan lehetnének képesek elméleti (mentális) jelenségek, amelyeknek nincsen fizikai – elsősorban energetikai (ez a felületes szemlélő számára megkérdőjelezhető; lényegében azt hiszem [Sz. J.] nem; ld. 10. sz. lapalji megjegyzésem) – jellemzői (characteristics), befolyásolni szervezetünk rendszereit, megindítani, szabályozni, leállítani stb. testi funkciókat?

Dubrovskij rögtön meg is válaszolja kérdéseit, mindez eleve csak az információ és anyagi hordozója közti reláció általános kérdése felől és a tradicionális kategoriális ellentét filozófiai szintű belátása útján közelíthető meg. Gondolatmenetében Dubrovskij az információ marxista értelmezésének alábbi három alaptételéből indul ki:

1. Információ nem létezik anyagi hordozóján kívül: kizárólag valamely anyagi rendszer (strukturális, dinamikus, vagy e kettő kombinált) tulajdonságaként fordulhat elő.

2. Az információ anyagi hordozójának fizikai tulajdonságaitól független („invariant to”), azaz ugyanazt az információt teljesen különböző fizikai hordozók közvetíthetik. Ezért lehetetlen és nincs is értelme az információ tisztán fizikai leírásának.

3. Az önorganizáló rendszerek által hordozott információ szemantikus és pragmatikus (célszerűségi – szándékossági) vonásokkal bír. (Azt hiszem Dubrovskij itt – szerintem biológiai objektumban szükségtelenül – csak elkerüli a kényes „teleologikus” fogalmat.)

Lehetetlen itt részletesen követnünk Dubrovskij okfejtését (további ilyen irányú orosz nyelvű munkáira az idézett helyen hivatkozik), de a filozófiai érdeklődésű olvasó számára melegen ajánlható a gondolatmenet részletes megismerése. Nem állítom, hogy a MacKay–Dubrovskij gondolatmenet megoldja az agy-elve összefüggés több évezredes problémáját, mégis meglepő, hogy e két nagyon ellentétes világnézeti bázisról elinduló, de az információ-és rendszerelméletet ismerő kutató, szinte szó szerint azonosan fogalmaz. ti. „embodied in”, amikor a mentalisnak a neuralishoz való, mint információnak a hordozójához való viszonyát próbálják jellemezni. Ami Dubrovskij-nál MacKay-al szemben új (habár MacKay számos előző gondolatmenetében ilyen elemek impliciten előfordulnak) az az, hogy az információ és fizikai hor-

³ Mondanunk sem kell talán, hogy itt és mindvégig agyelméleten tudományos agyelméletet és ezért monisztikus agyelméletet értünk. Dualista agyelmélet lehet hit kérdése (Eccles), de nem szükségszerűen – MacKay szigorú puritán protestáns vallásosság harcos képviselője, agyelmélete ennek ellenére dialektikus és monista –, lehet absztrakt filozófiai rendszer tükröződése (Popper), aki magát agnosztikusnak fémjelzi, végül lehet „ultimum refugium” a „nincs tovább” beismerése. Csak egy nem lehet mai tudományos ismereti rendszerünk és megismerési módszereink mellett: nem lehet tudományos elmélet. Ezért mai tudományos rendszerünkön belül nem diszkutibilis, ami persze nem egyenlő azzal – ennyire azért szerényeknek kell lennünk –, hogy egyszer s mindenkorra kizárjuk egy, a maitól radikálisan és minőségileg eltérő megismerés lehetőségét.

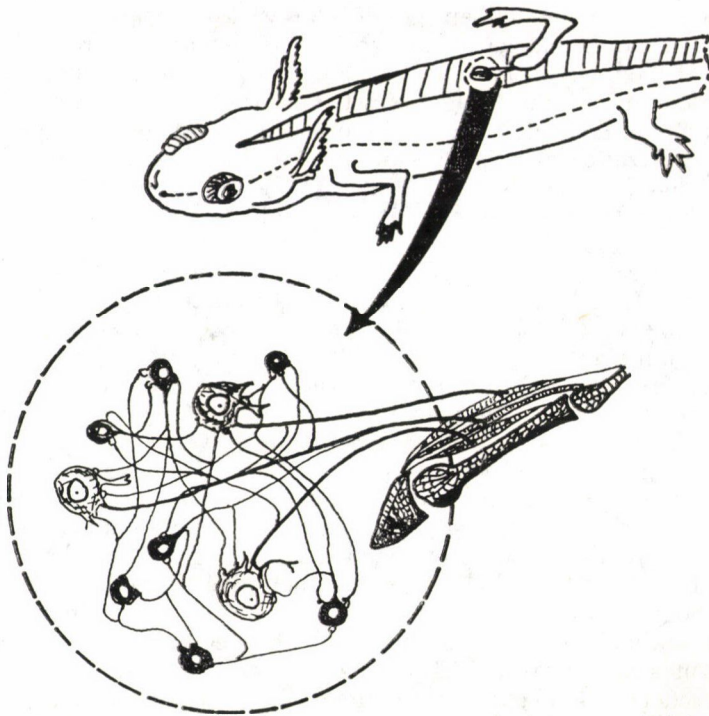
dozója közötti viszonyt az *agy-elme* problematikájában explicit módon „ön-organizáló” rendszer által hordott információs rendszerre vonatkoztatja, és egyben itt látja az egész probléma és a feloldhatatlannak tűnő kategoriális ellentét megközelítését.

Az idegi mint önorganizációs rendszer

Remélhetőleg az olvasó nem várja a magamfajta szerény agykutatótól, hogy az agy-elme kérdés filozófiai aspektusaiba ennél jobban belemerüljön (*Arany Jánossal* mondva „akinek esze van, ezt sem hiszi talán” [Jóka ördöge]). De azért a figyelmes és kritikus olvasó némi joggal mondhatja „mindez nagyon szép, mindez nagyon jó, de hol marad az agy”? (Semmi aggodalom, erre még rátérünk, sőt attól félünk még majd sok is lesz!)

Önorganizáló rendszerekről főleg a kibernetikai tudomány korai szakaszában rengeteget írtak, sőt műszaki analógiákat is készítettek (pl. *W. R. Ashby* „Design for a Brain”, Chapman and Hall, London, 1954), a legáltalánosabb tetszetős fogalmazás szerint „kölcsonösen kapcsolt nem lineáris folyamatok önorganizációs tendenciákkal rendelkeznek”. Ez rendben is lenne: neuronok véges automatákként foghatók fel, amelyek működése nem lineáris, egymással az ideghálózatban sokszorososan és általában a viszonyosság alapján kapcsolódnak, tehát az előbbi definíció szerint önorganizáló rendszereket hozhatnak létre. Csupán az a baj, hogy ilyen elméleti megállapításokkal önmagában még semmire sem megyünk.

Az idegrendszernek mint önorganizációs rendszernek gondolatával korábban, a 40-es évek végén már P. K. Anohinnál találkozunk, aki részben régebbi, *Ten Kate* által végzett kísérletek más körülmények közt való megismétléséből feltételezte, hogy a gerincvelő által vezérelt jellegzetes mozgásminták létrehozásában valami minimális mennyiségű, de egyébként minden specifitástól mentes bemenő ingerület (afferens input) szükséges. Anohint az akkori dogmatikus légkör és a pavlovi iskola erős reflex-orientáltsága akadályozta gondolatai kifejtésében (még így is bajba került 1950-ben); engem ilyen aggályok kevésbé gyötörtek. Egyébként is, pécsi anatómiai intézeti munkásságunkat akkoriban bizonyos fiatalos játékosság jellemezte és *Székelgy György*-ben (ma a DOTE Anatómiai Intézetének igazgatója) páratlan experimentátor munkatárssal rendelkeztem. Ezért *Ernst Jenő* filozófiai-politikai szemináriumainak belső baráti körében léptem tovább annak az (akkoriban szörnyű eretnekségnek tűnő) posztulátumnak a felvetésével, hogy az ideghálózat mint önorganizáló rendszer megteremti magának — a külvilág közbekapcsolásával (ti. arra való ráhatás és ennek visszahatásaként) — azt a szükséges bemenő ingerületi mintát, ami az Anohin által felismert működésekhez kell. Csak jóval később, az 1950-es évek végén jutottunk el oda — már a kibernetika első szenzációjának lecsengése után —, hogy *Székelgy Györggyel* specifikusabb kísérleteket végezzünk „modell-idegrendszereken” (*Acta Biol. Acad. Sci. Hung.*, 12, 253, 1962). Amint ez az 1. ábrából kitűnik, lényegében arról volt szó, hogy tarajos göte hátába ültetett idegszövetdarab kapcsolatba lépett a mellé ültetett végtagbimbóból kifejlődött számfeletti végtag izmaival (ezt a technikát már régebben *P. Weiss* amerikai biológus dolgozta ki). Ha voltak a kiültetett szövetdarabban mozgó idegsejtek, azok beidegezték a beültetett végtag izmait (1. ábra alsó diagram), és ezek „kijelezték” az ideghálózat tevékenységét. (Ma az ilyen kísérleteket szövetkultúrákban,



1. ábra. Kevés idegsejtből álló idegszövetdarab nagymértékben „randomizált” belső kapcsolatokkal, tarajos gőte lárvájának hátuszonyában. Az idegszövet darab beidegzi a mellé ültetett végtagbimbóból kifejlődött számféletti végtagot. Az alsó rajz némileg sémánisan mutatja, hogy a három nagyobb mozgatóidegsejt beidegzi a számféletti végtag izmait. A feketére rajzolt kisebb gátló és izgalmi közti neuronok hálózata önorganizáló jelleggel hozza létre a végtag furcsa rángásszerű rendetlen ciklusú mozgásaihoz vezető impulzusokat.

tisztább körülmények közt és az egyes idegsejtek aktivitásának mikroelektródákkal való regisztrálásával végzik.) Felismerésünkben új volt, hogy ilyen modell-idegrendszerek működéséhez bemenő impulzusok nem kellenek, a benne levő kisebb (feketére rajzolt) közti neuronok hálózata önorganizációs⁴ módon termeli ki saját aktivitását. Az idegsejtek kapcsolatai ilyen primitív rendszerben „véletlenszerűek” (az idézőjel itt azt jelenti, hogy az elágazás random, de milyen típusú idegsejt milyen másikkal alkothat működő kapcsolatot, arra vonatkozóan lehetnek megkötöttségek), mégis bizonyos jellegzetes idegi jellegű magatartás (gátlás, facilitáció, jellegzetes mozgásmintázatok ciklikusan visszatérő jellege stb.) mutatkozik. Jóval később 1972-ben *Wilson* és *Cowan* (*Biophys. J.* 12, 1–24, majd később *Kybernetik*, 13; 55–80,

⁴ A biológiában persze már régebben ismertté váltak olyan folyamatok, melyek az önorganizációs rendszerekre mintául szolgálhatnak: ilyenek a víruskutatásban, a sejt-hártyával mint önorganizációs rendszerrel, bizonyos sejtek közötti asszociációs jelenségekben voltak kimutathatók, és ezeket részletesen kivizsgálták. Habár az önorganizációnak kétségtelen modelljei, ezek nagyságrendileg alacsonyabb organizációs szinten jelentkeztek, ezért belőlük az idegrendszerre vonatkozó közvetlen következtetéseket nem lehet levonni.

1973) matematikai modellben gondolat kísérletként ugyanezt a szituációt szimulálták: random hálózatot képező izgalmi és gátló neuronokkal, azzal az eredménnyel, hogy ilyen hálózatok különböző paramétereiknek változtatásával háromféle dinamikus magatartást mutatnak: 1. transiens válaszokat; 2. határciklus viselkedést; 3. térben inhomogén állandó egyensúlyi állapotokat. Más szóval hálózatszerűen és kölcsönösen összekapcsolt neuronok ilyen matematikai modellekben azt, sőt annál még sokkal többet mutattak (önorganizációs működések tekintetében), mint amit sokkal régebbi kísérleteinkből intuitíve következtettünk.

Ezzel körülbelül egyidőben *A. Katchalsky* (*Katchalsky, Rowland és Blumenthal*: Neurosci. Res. Bull. 12: 1–187, 1974) a fizikából, kémiából, sőt élőlény-populációk magatartásából vett példák sokaságával utaltak arra, hogy az ún. „dinamikus mintázatok”, vagy miután többségükben energiafogyasztók, ún. „disszipatív struktúrák” szerepet vihetnek az ideghálózatok működésében. Ezt a gondolatot egyébként már jóval korábban *Cragg és Temperley* is felvetették (*Electroencephalogr. and clin. Neurophysiol.* 6: 85–92, 1954), de mind az ő, mind *Katchalsky* későbbi érvelését az idegkutatók többsége elvetette azzal, hogy ilyen dinamikus mintázatok létrejöttének alapfeltételei⁵, ti. bizonyos randomitás a belső kapcsolatokban, eleve nem lehetnek adottak a normális idegrendszerben. Ezért a mi említett régebbi kísérletünk sem lehet bizonyító, mert mi nem valódi, hanem „randomizált” modellel kísérleteztünk.

Ahhoz, hogy az olvasónak némi fogalmat nyújtsunk a dinamikus minták lényegéről, utalnunk kell a kémiából ismert legegységesebb modellre, az oszcilláló, vagy más néven „rotáló” *Bjelouszov-Zsobotinszkij* (1959–1964) reakcióra. Az eredeti reakció gyenge színeffektusát lényegesen javítja és fényképezhetővé teszi *Winfree* (*Sci. Amer.* 230: 82–95, 1974) módosítása. A 2. ábra mutatja a reakció dinamikusan változó térbeli mintázatának egy mozzanatát. Az indikátor a reakció helyi állapota szerint hol kék, hol piros színt mutat és a szomszédos molekulák közötti kooperatív kölcsönhatás révén nem a színek keveredése, hanem szeszélyesen változó kék-piros örvénylő rajzolatok keletkeznek. A reakció mindaddig zajlik, míg az elegyben bromid ion van, ennek felhasználódása után az oszcillációk megszűnnek. Nem teljesen tisztázott, hogy pontosan milyen kémiai folyamatok zajlanak le az elegy minden konkrét helyén, de nem ez a fontos, hiszen ez csupán egy a számos analógia közül és természetesen csak külsőleges modellje annak, ami „random” ideghálózatban történhet *Wilson és Cowan* fentebb említett matematikai elemzése szerint.⁶

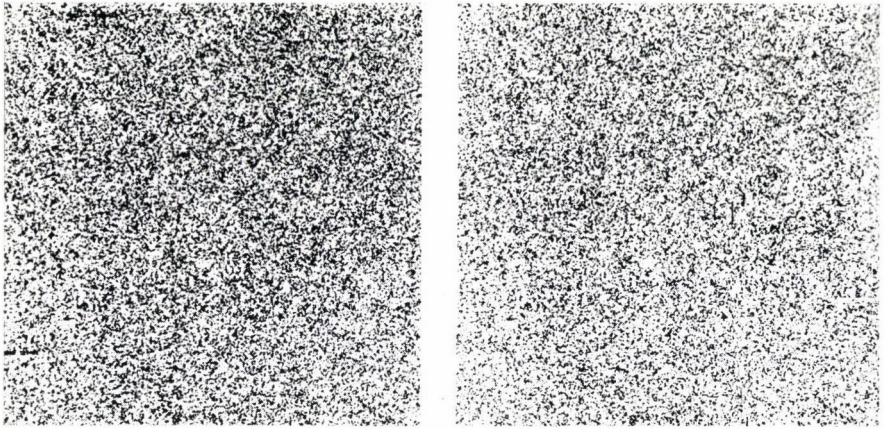
Ezzel azonban még nem oszlattuk el azt az előbb említett aggályt, hogy miután a természetes ideghálózat oly specifikusan „huzalozott” sőt még az ingerületvezetési irány is meghatározott, ezek a modellek nem alkalmazhatók a valódi ideghálózatokra. Valóban közel száz évig, azaz az idegrendszer elvi felépítését tisztázó neurontannak az 1880-as évek végén történt megfogalmazásától néhány évvel ezelőttig, ilyen jelenségek feltételezése képtelenség lett volna. Sőt az idegkutatók többsége még ma is nagy idegenkedéssel fogad

⁵ A „randomitás” nem feltétele a „dinamicitásnak”, de valószínűsítheti annak létrejöttét; a „randomitás” pontosítandó fogalom — azért fogalmazok itt így leegyszerűsítve, mert a probléma szigorú kifejtése meghaladná nemcsak az én, de az olvasó képességét is.

⁶ Az érdeklődő olvasó számára ilyen reakciókra vonatkozó néhány irodalmi adatot adhatunk meg: *B. P. Bjelouszov* (*Medgiz, Moszkva, 1959 pp. 145*) *A. M. Zsobotinszkij* (*Dokl. Akad. Nauk, Sz. Sz. Sz. R., 157: 392–395, 1964*), *A. T. Winfree* (*Science, 181: 937–939, 1973*).



2. ábra. A Bjelouszov–Zsabortinszkij-féle oszcilláló reakció egy mozzanata a kísérlet Winfree-féle módosításában (Sci. Amer. 1978. jún. füzetéből). Jellemzőek a koncentrikus spirális mintázatok, amelyek állandó változásban vannak. Példa az ún. „dinamikus mintákra”.



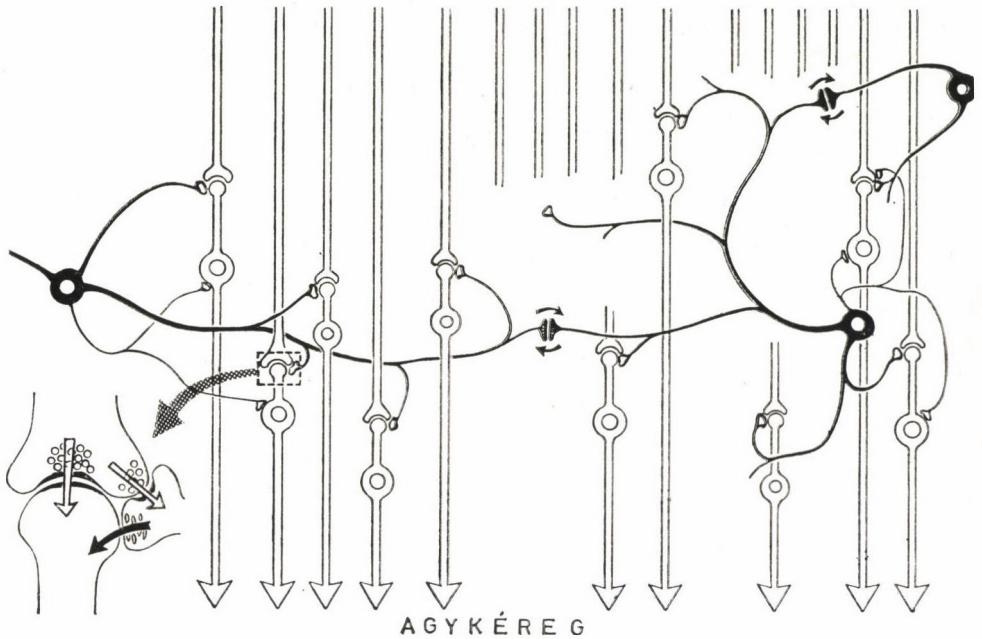
6. ábra. Jellegetes Julesz mintázat: 90% fehér, 10% fekete pontok 10^6 számban. A két, eredetileg azonos random mintát egymáshoz viszonyítva a számítógép úgy tolta el, hogy sztereoszkópos szemüveggel nézve nyeregídom (hiperboloid paraboloid) térbeli benyomását keltse. További magyarázat a szövegben.

minden olyan gondolatot (1975-ben az USA-ban kísérleteztem zártabb és távolról sem ortodox szakmai körben ilyen okoskodással, és páratlan „színpadi bukásban” volt részem; azóta a helyzet valamelyest javult). Pedig már elég régóta tudták, hogy egyes idegközpontokban vannak olyan idegelemek, amelyekben az ingerületvezetés iránya nem lehet meghatározott. Ilyenek a szem ideghártyájának (ami az agy kihelyezett része) ún. *amakrin* sejtjei és a szaglőlebens számos idegsejtje. Később, a 70-es évek kezdete óta, tudjuk, hogy rengeteg — nagyobbára gátló — idegsejtben az ingerületvezetés iránya nem meghatározott, hanem a mindenkori körülményektől függő. A legfőbb kéregalatti magrendszerünk, az ún. *thalamus* valamennyi ún. közti neuronja ilyen, ún. preszinaptikus dendrittel működő elem. Ennek következményét a legjobban a látópálya kéreglátati magvának (*corpus geniculatum laterale*) szerkezetével tudnám illusztrálni. Minden logika szerint olyan érzőrendszer, mint a látópálya, legfőbb követelménye az lenne, hogy a szem törőközegei által az ideghártyára, tehát látóreceptoraira vetített fordított, kicsinyített kép minden pontjáról az impulzusok diszkrét pályákon (van is erre több mint egy millió látóidegrostunk) az agykéreg megfelelő pontjához közvetíttessenek. Ehelyett a pálya útjába kapcsolt közbülső állomáson egy speciális gátló neuronrendszer van, amely bizonyos határok közt minden információs csatornát közeli és távolabbi szomszédjaival összekapcsol (3. ábra). Persze elméletben lehetséges, hogy ennek a szerkezetnek egyszerű magyarázata van, és nincs másról szó, mint alak-, mozgás-, nagyság- és koincidencia-felismerés valamilyen mechanizmusáról (*Lábos, E., Journ. Neurosc. Res., 3: 1–10, 1977*), de ugyanakkor nem hunyhatunk szemet afölött, hogy a precíz diszkrét huzalozásra egy randomizáló tényező épül rá szinte minden alacsonyabb idegmechanizmusban. Ez pont elégséges lenne arra, hogy a diszkrét csatornákon továbbított impulzusminták mellett — mintegy azok felett — dinamikus kölcsönhatási mintázat is keletkezzék.

Saját kutatásunknak az 1970-es évek közepéig az volt a vezérgondolata, hogy az alacsony idegmechanizmusokat magában a neuronhálózatokban rejlő új minőségi funkciók lehetőségek magyarázzák. A nyugaton divatos, mereven preformisztikus konnektivisztikus — azaz mindent specifikus összeköttetésekkel magyarázó *Sperry*-féle képzetekkel szemben főleg *Székely György* és munkatársai számos kísérleti embriológiai modell (járómozgások mechanizmusai, számfeletti végtagok és szemtelepek felől kiváltott reflexek stb.) jelenségeit a specifikus ideghálózatok különleges teljesítményére próbálták visszavezetni. (Ezekre még irodalmi utalásokkal sem térhetünk ki, mert magának az alapképzetrendszernek a vázolója is messze meghaladná e cikk kereteit.) Hogy konvencionális elemi neuronhálózatokban (tehát olyanokban, amelyek klasszikus hisztodinamiásan⁷ polarizált neuronokból épülnek fel) milyen rendkívüli, minőségileg új lehetőségek rejlenek, ezt elektronikus „műneuronokból” létrehozott hálózatokkal többen (nagyon elegánsan: *Székely, Acta Physiol. Acad. Sci. Hung. 22, 285–289, 1965*) is igazolták. Mégis, kísérleteinkben, mind

⁷ Histodinamiás polarizáltságon azt értették az idegtudományok klasszikusai, hogy az idegsejteket normális viszonyok közt a hozzávezetett impulzusok a sejttesten vagy rövid, dendriteknek nevezett, nyúlványain érik, viszont saját maguk által termelt impulzusukat hosszabb idegnyúlványukon (a neuriten) keresztül adják le (centrifugális vezetéssel) egy újabb neuron testén vagy dendritjein. Fordított irányú impulzusvezetés a klasszikus képzetek szerint normális működési viszonyok közt nem volt elképzelhető.

ÉRZÉKSZERV RECEPTORAI

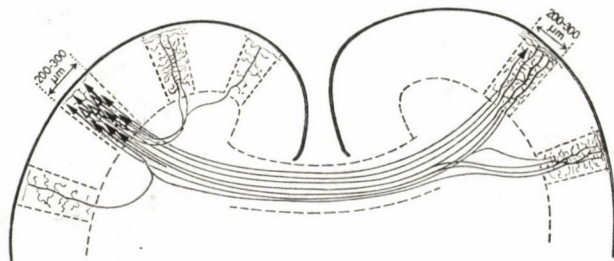


3. ábra. Érzékszervi pálya (látópálya) megszakításának elve a kéregalatti magvakban (corpus geniculatum laterale). A többé-kevésbé diszkrét csatornákon vezetett impulzusok átkapcsolásába egy gátló közti neuronokból (fekete sejtek) hálózat avatkozik közbe. Minden ilyen gátló sejt számos szomszédságában levő hasonló sejttel egymást kölcsönösen gátló kapcsolatokkal bír (fekete nyilak). Az érzékszervi receptorok felől jövő ingerületi csatorna minden megszakításánál több ilyen gátló végződés avatkozik közbe. A bal alsó séma mutatja egy ilyen kapcsolási „triád” elektronmikroszkóppal látható részleteit. Az érzékszervi receptor felől jövő impulzus izgatja (üres nyíl) a kéreghez továbbító elemet (lefelé) és a gátló közti neuron végződését (jobbra). Ez utóbbi viszont gátolja (fekete nyíl) a kéreghez vezető elemet. A gátló sejtekben az ingerületvezetés iránya határozatlan; attól függ hány és hol levő pontján kap impulzusokat. E sejtek még a kéreg kontrollja alatt is állnak.

Székelyéiben, mind saját, *Scháb Rezső*vel regenerált (tehát randomizált huzalozású) szemmozgató idegek által kivitelezett reflexekkel végzett kísérletekben mindig fennmaradt egy olyan hiányérzetünk, hogy az ideghálózat valamilyen módon „többet tud annál”, főleg a működésének bizonyos holisztikus-teleologikus vonatkozásaiban, mint amit konvencionális neuronhálózatok működési képességei legoptimistább értékelése is megengedne. Ezzel az ellentmondással küszködtek az idegműködés egészét magyarázni kívánók már a múlt század utolsó évtizedei óta, talán legtudatosabban P. K. Anohin, de senki sem tudott a problémával valóban megbirkózni, sem annak megoldásához világos kísérleti feltételeket teremteni. A dinamikus mintázatok elmélete radikálisan új helyzetet teremt, de ezt már jobban megközelíthetjük az idegrendszer legfelsőbb centrumának, az agykéregnek a vizsgálatával.

Az agykéreg szerkezete és működési elve

Ma már tudjuk, hogy az agykéreg lényegében hat rétegén áthatoló függőleges oszlopszerű — mintegy 200–300 mikron átmérőjű (emberben kb. 2,5 mm magas) — egységek (ún. „modulok”) mozaikja. Ilyen méretű működési egységek átlagban 5000 sejtet tartalmaznak, amelyek belső összeköttetési rendszere, a benne előforduló jellemző alakú és elágazódású izgalmi és gátló idegsejtek folytán örökletesen determinált, hasonlóan örökletesen meghatározott minden állatfajban a kéreg különböző moduljai közötti, valamint az alacsonyabb központokkal való „huzalozás” is. Ezt az elvet, az egyszerűség kedvéért a nem tekervényezett agyú állaton (mondjuk egér vagy patkány), a 4. ábra magyarázza. [A furcsa az, hogy az emlősökben a kéreg eme műkö-

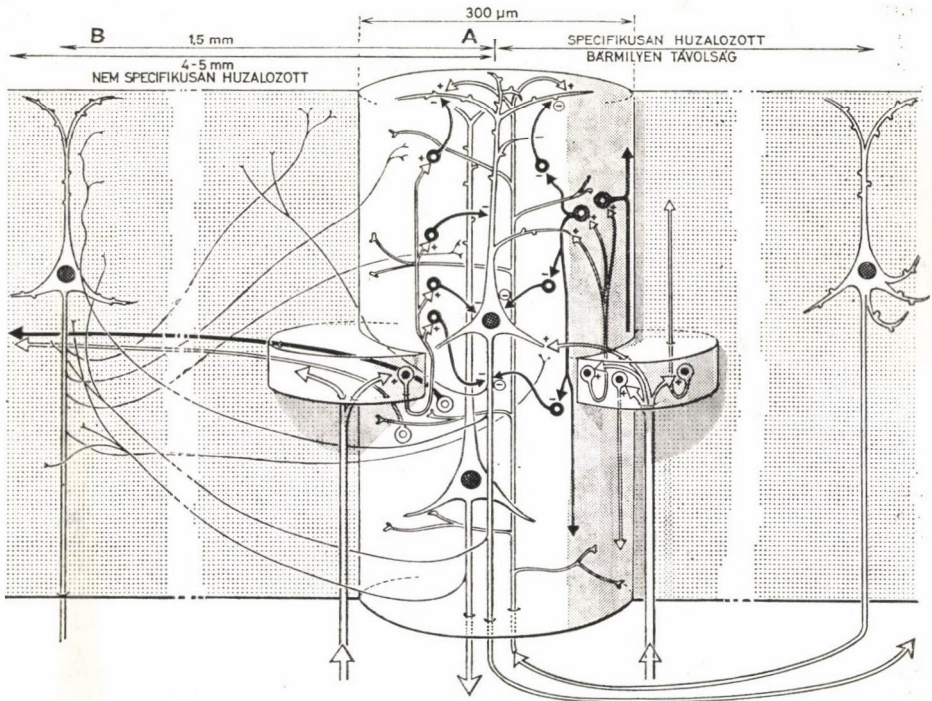


4. ábra. Az agykéreg úgynevezett moduljainak kapcsolatai sémásan, nem tekervényezett állat agyának keresztmetszetén. A bal oldalon kirajzolt modul piramisneuronjai közül az üresen rajzolt nyúlványai az azonos oldali kéreg különböző hasonló moduljaihoz vezetnek. A feketén rajzolt piramisneuronok nyúlványai a két féltékét összekötő, ún. kérgestesten keresztül a másik agyfél moduljaihoz vezetnek. Ez esetben a kapcsolatok bizonyos tükrözési viszonyosságot mutatnak.

dési egységeinek elvi felépítése, sőt nagysága és sejtszáma is azonos (az érdeklődők a főbb tények összefoglalását 1977. évi Ferrier előadásomban találják meg [angol nyelven] Proc. Roy. Soc. B. 201, 219–248 [1978]), az ember és az egér közötti különbség a modulok számában és ennek folytán összeköttetések gazdagságában van. Embernek 10 milliárd kéregsejtje, ezért a legóvatosabb becsléssel két millió ilyen működési egysége van, alacsonyabb rendű állatnak pár ezer. „Egységen” persze ez esetben nem azt kell értenünk, hogy az 5000 sejt csak egyféle működési állapotban lehet. Csak a tekintetben egység, hogy a „bemenet” (az elektronika nyelvén, „input”) mondjuk 500 csatornán a fentebb megadott diszkrét terekben eléggé szétosztottan érkezik be, és a mindenkori bemenő impulzusok különböző lehetséges óriási számú kombinációi és a hálózat „előéletéből” származó (tehát hogy azelőtt mi ment oda be, hogyan dolgoztatott fel és mi maradt meg ennek nyomán) helyzet szerint a működésbe hozott izgalmi és gátló idegsejtek szelektálnak mondjuk 50–100-at a kimenő kapcsolatokkal bíró kb. 2500 sejtéből. Nehéz megbecsülni, hogy egyetlen „egység” hányféle működési állapot szelektációjára képes. Minden kérgi modul néhány száz más kérgi modullal és hasonló számú alacsonyabb idegközpont modullal van kapcsolatban.⁸

⁸ A magasabb rendű élőlények idegközpontjai a modul-rendszer elvén épülnek fel, ennek részletes kifejtését l. SZENTÁGOTHAJ–ARBIB, 1975 Conceptual Models etc. MIT kiadványban vagy oroszul: Konceptualnűje Modeli etc. MIR. Moszkva, 1976.

Egy ilyen „modul” belső kapcsolatait nagymértékben leegyszerűsítve az 5. ábra középső, hengerszerű idoma illusztrálja. A tömör feketén rajzolt idegsejtek (kis gömbök) és nyíl formájában érzékeltetett kapcsolataik gátlók, az üres gömbök és üres nyilak izgalmi küzbülső neuronok, a nagyobb, magas piramis alakú sejtek a kéreg „kimenő” (output) elemei, a piramis sejtek. Az ábra



5. ábra. Egy kéregmodul (középső henger) kapcsolatai távolabbi (jobb felé) és közelebbi kéregrészekkel (balfelé). A kéregmodulban pontos genetikusan meghatározott huzalozás szerint néhány száz távolabbi piramisajt nyúlványa (egy képviselője jobb oldalt kirajzolva) végződik. A kéregalatti központokból származó impulzusok (pl. érzékszervi eredetű pályák) a modultól független, de hasonló átmérőjű lapos korong alakú terekben végződnek. A modul a mindenkori bemenő ingerületi minta szerint kidolgozza gátló (kis fekete) és izgalmi (kis üres gömbök) közötti neuronjaival a maga kapcsoló-működését és ennek eredményét „kijelzi” a kb. 2500 piramisajtjei (kettő részletesen kirajzolva) bizonyos kombinációjával más kérgi modulok vagy kéregalatti központok számára. A séma bal fele azt mutatja, hogy másfél mm távolságra (és más elemekkel 3–4 mm távolságra) „esetleges” (random jellegű) kapcsolatok vannak a modulnak minden irányú szomszédsága felé. E kapcsolatok 1,5 mm-en belül viszonyosak és szimmetrikusak, azaz tetszőleges A-modul ugyanolyan kapcsolattal bír B-modullal, mint B-modul A-val. E kapcsolatok a „konvencionális” kapcsolási műveleteken túl „dinamikus ingerületi mintázatokat” hozhatnak létre.

jobb oldala azt próbálja érzékeltetni, hogy a kéreg kimenő kapcsolatai (más kéregrészekhez vagy alacsonyabb központokhoz) specifikusan „címzettek”, tehát modul nagyságrendben genetikusan meghatározott további helyekhez mennek. Ilyen értelemben genetikusan címzettek a középpütt ábrázolt modul bemenő pályái részben a függőleges modulhoz, részben a két lapos korongban

ábrázolt terek közvetítésével beérkező, pl. érzékszervi pályákkal együtt. A nyilak végeihez rajzolt + és - jelek a hatás izgalmi (+) vagy gátló jellegét () jelölik. Az ábra bal oldala viszont azt mutatja, hogy 1,5 mm sugarú körben a piramisjétek helyi mellékágai révén és cca. 4–5 mm sugarú körben egyéb nem, vagy csak nagyon kevésbé címzett helyi kapcsolatok vannak (egyszerű geometriai megfontolásból minden modul 2500 piramisjéte így a szomszédos 75–100 modul 200–250 000 másik piramisjéttel bizonyos „véletlenszerű” kapcsolatokkal rendelkezik). Ráadásul a kapcsolatok kölcsönösen szimmetrikusak, azaz „A” modul másfél milliméter sugaron belüli tetszés szerinti „B” modullal körülbelül ugyanolyan kapcsolattal rendelkezik mint „B”–„A”-val. Ezenkívül, újabb felismeréseink szerint, a kérgen belül is vannak — majomban és feltehetően emberben különösen szép számban — nem konvencionális neuronok is, olyanok mint amelyeket a 3. ábra próbált bemutatni.

Ha ez így van, márpedig szerkezeti elemzésünk mai eredményei más kiutat alig engednek, akkor a kéreg azon túlmenően, hogy csodálatosan precíz és genetikusan meghatározott „huzalozású” idegi gépezet, erre ráépül egy olyan esetleges és kölcsönösen szimmetrikus (kvázi random) kapcsolatrendszer, amely mindenben megfelel Wilson és Cowan említett 1973-as matematikai modelljének. E modellnek érdekessége pedig az, hogy egy kétdimenziós kvázi agykéreg segítségével számos, a pszichológiából régen ismert illúziót remekül lehet szimulálni minden specifikus kapcsolat nélkül is, tehát olyasmit, amit ugyan az igazi agykéreg ténylegesen produkál, de eddig semmiféle hagyományos fiziológiával és anatómiával nem lehet megmagyarázni. Ezzel tehát együtt van az a nyersanyag amiből egységes agyelmélet kezdeményei összeállhatnak.

„Dinamikus minták”

Neuronhálózatokban — elméleti és analóg jelenségekre alkalmazott megfontolásokból, primitív szövetkultúrákban tett észleletekből és a legújabb szerkezeti ismeretekből egyaránt logikusan következtethetően — létrejöhethető, ún. „dinamikus minták” vagy „disszipatív struktúrák” (hiszen létrejöttük energiadisszipációval jár együtt) nyilvánvalóan még nem „agyelmélet”, hanem ehhez csupán némi kezdeti „fogódkodók”. Alkalmasak feloldani azt a fejtegetéseink kezdetén említett látszólagos ellentétet, ami a szigorúan induktív idegtudományok eredményei és a pszichológia és magatartástudományok közt fennáll. Kiutat mutat a filozófiailag vagy természettudományosan elfogadhatatlan reduktivista, mechanikus materialista és a dualista interakcionista álmagyarázatok közt, egy egyértelműen monista és dialektikus szemlélet felé. Esetleg kiegészíthet bennünket az információ és fizikai hordozója közötti kategoriális zavarból, ami az egész kérdésnek kulcsfontja. Erre azonban csak fejtegetéseink végén utalhatunk, és nem is érezzük magunkat filozófiailag kellően felkészültnek a probléma rendszeres végiggondolására.

Közelítsük meg azonban a kérdést egy könnyebb oldaláról. *Julesz Béla* (The Foundation of Cysclopean Perception, Chicago Univ. Press, 1971) számítógéppel random generált — mondjuk — 90% fehér, 10% fekete mintás négyyszögeket, amelyeknek pl. 1000 sorában 1000 helyre kerülhetett az említett százalékban, de egyébként teljesen esetleges fehér vagy fekete folt (esetleg négyyszög stb., a minta elemeinek alakja közömbös). Minthogy a számítógép me-

móriájában tárolta, hogy az egy millió hely mindegyikére mi jött ki, fekete vagy fehér, nem nehéz a számítógépet úgy instruálni, hogy ugyanezt a szemünk számára teljesen közömbös mintát pontosan megismételje, de úgy, hogy mondjuk egy középső négyzet alakú területen a mintát 50–100 sorral jobbra tolja el (a balra szabadon maradó helyet a jobb oldalt feleslegessé vált mintával töltse ki). Ha az ember mármint az így létrejött két négyzetet — amely önmagában teljesen random és kettő tökéletes ismétlése önmagának, csupán a jobb négyzet belső négyzete a baléhoz képest valamelyest jobbra tolt — stereoszkópos szemüveggel megnézi, ezzel a két négyzetet látóterében fedésbe hozza, eleinte 7–8 másodpercig semmi sem történik, csak szürke négyszöget lát. Majd hirtelen, anélkül, hogy a kísérleti személy tudná mit kell látnia, egyszerre „szembe szökik”, hogy középen egy négyzet alakú terület síkja hátrább van, mint a nagyobb négyzet kerete. Mi történt? Az agy látókérgének fiziológiai tanulmányozásából tudjuk, hogy emberben, valószínűleg az ún. másodlagos látókérget képező Brodman 18-as területen, olyan idegsejtjeink vannak, amelyek csak akkor lépnek működésbe, ha mindkét szemünk látóterében ugyanaz a tárgy kissé más oldaláról — pl. önmagával párhuzamosan eltolva — jelenik meg. E sejteket „diszparitás receptorok”-nak nevezik, és segítségükkel van valódi térbeli látásunk. Ti. két szemünkkel a tárgyakat kissé másképp látjuk, és ez a „diszparitás receptorok” ingere. De miért kell hét—nyolc másodperc ahhoz, hogy a Julesz-féle mintában meglássuk a térbeliséget, amikor a 18-as kéregterületek sejtjei egy másodperc törtrésze alatt már érzékelik a két azonos, bár önmagában értelmetlen minta egymáshoz viszonyított eltolódását? Hát igen, itt van az agyműködésnek az a klasszikus idegfiziológiával és klasszikus huzalozással eleve megmagyarázhatatlan titka. Julesz maga, aki nem agykutató hanem elektronikus mérnök, de az általa kidolgozott kísérletekben rejló óriási neuropszichológiai jelentőséget felismerte, ezért felveti a gondolatot — persze csak analógiaként —, hogy valamilyen kooperatív mechanizmusnak kell fellépnie az idegelemek között, amellyel fokozatosan átrendeződnek kapcsolataik, mindaddig míg a képben levő „rendetlenségéből” az idegrendszer kihámozza a benne rejló egyetlen „rendet”. (Julesz rendkívül szellemes, kapcsolt mágnestűk halmazából álló modellel illusztrálja ezt a gondolatot, de ennek leírása messze túl menne cikkünk keretein). Julesz Béla egyik legszebb mintáját adja a 6. ábra, amelyet ha stereoszkópos szemüveggel nézünk, avagy ha kancsalítani jól tudó olvasónk kb. 25–30 cm távolságból nézve a képet úgy kancsalít, hogy a keletkező négy kép közül a két középső pontosan fedésbe kerüljön (tehát három szabályos négyzetet lát és ezt fenn is tudja tartani 8 másodpercig), jutalmul egy függőleges tengelyű hiperbolikus paraboloidot, (magyarul nyeregszerű idomot) lát a középső képben. Itt ugyanis a számítógépet úgy programozták, hogy az első random mintához a második úgy legyen eltolva, hogy ilyen idomot hozzon létre.

Ez azonban a jelenségek csak egyik oldala: a másik, az agy működése szempontjából még fontosabb oldala az, hogy aki egy-egy ilyen mintát *egyszer* (!) fúzióba hozott, tehát térbeliségét látta, akár hónapok múlva (akár 100 vagy több ilyen mintát újra megnéz) a másodperc törtrésze alatt újra látja a térbeli idomot, anélkül hogy tudná, hogy a sok egyszer már látott minta közül melyiket nézi. Elég tehát, hogy agyunk *egyetlen egyszer* létrehozta a két önmagában teljesen értelmetlen mintából az *egyetlen lehetséges rendet*, ami abból áll, hogy az egyik rész a másikhoz viszonyítva valamicskét eltolódott, akkor ezt pillanatok alatt újra létrehozza. Ebből láthatjuk, hogy meny-

nyire értelmetlen kérdés azon gondolkodni, hogy agyunk hány bit információt képes elraktározni egy meghatározott idő vagy egy egész emberi élet során. Mennyi bit információ van a 6. ábrában? Ráadásul túlnyomó többsége teljesen értelmetlen, mégis minden tanulás nélkül egyetlen „rendcsinálás” elég arra, hogy maradandóan bennünk legyen!

Tovább menve, arra is kell gondolnunk, mennyire reálisak eddigi tanulás-memória elméleteink és modelljeink? Attól félek semennyire. Ha egyetlen „rendcsinálás” a 18-as látókérgünkben levő pár ezer „diszparitás receptor” részéről elég arra, hogy hónapokra, esetleg évekre rögzíti agyunkban azt a képességet, hogy két önmagában értelmetlen képminta egyetlen „értelmes részét”, a kettő közti különbséget azonnal észrevegye, akkor valamiféle „RNS (vagy DNS) engramm rögzítő mechanizmus” — legtöbb mai memória-elméletnek így vagy úgy lényeges alapeleme — közbejöttének pusztá feltételezése is abszurdum. Igen, de ha ez nincs akkor mi van? Sajnos erre a jogos kérdésre a válasszal adósoknak kell maradnunk.

Ami az idegrendszer működésének és szerkezetének mai ismerete szerint lehetséges — helyesebben valószínű —, az az, hogy legalábbis a gerinces idegrendszer minden szintjén, a hagyományos kapcsoló műveletek mellett „dinamikus minták” is kialakulnak, amelyek a neuronhálózat olyasféle „szuperstruktúrái” mint amilyenek a Bjelouszov—Zsobotinszkij-reakcióban (vagy számtalan más fizikai vagy kémiai modellben, ha azon energia folyik át) létrejöhetnek. Ezek a „szuperstruktúrák” ugyanolyan reális természeti jelenségek, amelyek a nem egyensúlyi termodinamika eszközeivel leírhatók, mint bármi más fizikai jelenség, de a neuronhálózat konvencionális kapcsoló műveletére minőségileg magasabb szintként épülnek rá (úgy is mondhatnánk „a mozgás magasabb szintjei”). Sőt az sem zárható ki, hogy szomszédos vagy konvencionális kapcsolatokkal összekötött neuronhálózatok eme „szuperstruktúrái” újabb magasabb hierarchiájú „szuper-szuperstruktúrákat” hoznak létre. Ezeknek végső legfelsőbb individuális szintje lenne a „tudat” idegi megfelelője.

Amikor „tanulunk”, akkor a „szuperstruktúráink” módosulnak. Minden az idegrendszert ért új benyomás után idegrendszerünk nem az, ami volt, hanem módosult („szuper-) struktúra”. És amikor emlékezünk, ez a módosult struktúra jelentkezik tudatunkban. Igen, de akkor mitől emlékezik idősebb ember 70 év előtti gyermekkorában történetekre? Megint nem tudnék válaszolni, de vigasztal, hogy az eddigi memória-elméletek sem tudtak elfogadható válasszal szolgálni. Mitől ilyen viszonylagosan állandók az egyszerű kialakult szuperstruktúrák (a Julesz kísérletben történt „rendcsinálás”)? Valószínűleg attól, hogy a szuperstruktúrák sohasem szűnnek meg, még álmunkban sem. A kérgi neuronok alvás közben észlelt aktivitásáról szerzett legújabb információink szerint (*Steriade, Behav. and Brain Sci., Vol. 1, part 3, 1979*) alváskor csak a „kimenetet” adó neuronok hallgatnak el agykérgünkben, sok belső kapcsolatú neuron a valóságban erősen fokozott aktivitásban van. Képletesen szólva alváskor, ill. tudat alatt ébrenlétben is mindig mindent újra lejátszik idegrendszerünk, és tudatossá csak akkor lesz, ha azt a pillanatnyi helyzet kívánja. Így képzelhető a „szuperstruktúrák” viszonylagos stabilitása és talán nem véletlen, hogy a Nobel díjas *G. M. Edelman* (1978)⁹ szellemes agy-

⁹ V. B. MOUNTCASTLE és G. M. EDELMAN, „The Mindful Brain”, MIT Press Cambridge Mass. 1978; Megjelenik „The Neurosciences. IV. Intensive Study Program.” Boulder Col. MIT. Cambridge, Mass. 1979.

elmélete, amely egyébként az itt elmondottaktól nagyon eltérő pályán mozog, nevében („Degenerate group selection and phasic reentrant signaling theory”) is szükségesnek tartotta rögzíteni a feldolgozott ingerületi mintának állandó fázikus visszatáplálását.

Agyelmélet?

Amit itt elmondottunk még *nem agyelmélet*, ehhez a helyzet talán még nem is érett. De egy, az idegrendszer szerkezetének és működésének az eddigiektől radikálisan eltérő szemlélete, amely döntően neuronhálózatok működéseire vonatkozó matematikai elméletekre, az agy néhány új szerkezeti vonására és a modern kísérleti pszichológia néhány meglepő és paradoxnak tűnő eredményére alapozott. A legjobb esetben kezdemény további munka számára, amiben továbbra is, sőt az eddigieken messze túlmenően az idegtudományok kísérleti művelőin kívül, pszichológusoknak, matematikusoknak, az információelmélet szakembereinek, elméleti fizikusoknak és nem utolsósorban filozófusoknak kell résztvenni.

Befejezésül talán csak még annyit: főleg a reduktivisták, (de mint láttuk az emergentista-materialista Bunge is) értelmetlennek látja annak a kérdésnek a felvetését is, hogy az „információ visszahat fizikai hordozójára” (tehát az elme [= mind] az agyra [= brain]). De ne felejtjük, az agy önorganizáló rendszer és információ és entrópia közt van bizonyos kapcsolat (ezért fogalmaztam a Julesz kísérletekkel kapcsolatban úgy, hogy „rendcsinálás” a „rendezetlenben”, — amire agyunk lényegében való) — „valóban olyan abszurd tehát ez a feltételezés”¹⁰

¹⁰ A klasszikus termodinamika képviselői általában idegenkednek a kérdés ilyen formában való felvetésétől (feltehetően, mert a termodinamika természeti jelenséget ír le, az információelmélet pedig lényegében gondolati konstrukció). Az érdeklődőknek javasolható, hogy tanulmányozzák ehhez L. Brillouin „Science and Information theory” 2. kiad. Academic Press, New York 1962. c. könyvét, főleg 13. és köv. fejezeteit). Itt megtalálja a „Maxwell démon” körüli vita (Szilárd L. Z. Physik 53. 840, 1929; Gábor D. MIT Lectures, 1951 stb.) részletes tárgyalását. Egészben véve nem kétséges, hogy negentropia veszteséggel információ nyerhető és ezzel újabb negentropia építhető fel. A lényeges azonban az, hogy mindkét transformáció veszteséges, tehát ha az egészet kiterjesztett Carnot körfolyamatnak fogjuk fel, ennek összes feltétele teljesül. (Persze a „veszteség” az idegrendszert nem érdekli, mert elő anyagként a „külvilág” rovására gyakorlatilag korlát nélkül építheti fel saját negentropiáját.) Ezt az általános Carnot elvet Brillouin az „információ negentropia elve” néven a $\Delta(S-I) \leq 0$ (idézet helyen 228. old. 15. 91) kifejezésben formalizálja. — Ennek ellenére befejező mondatom szónoki kérdése nem állítás (legfeljebb a magam számára és erős fenntartással). MacKay (Neuroscience, — 1978. 3, 599.) a kérdés ilyen felvetését éppoly értelmetlennek tartja mint mondjuk azt, hogy: miképpen determinálja egy számítógép fizikai működését az a matematikai egyenlet, amelyet megold? Be kell vallanom itt szerény tudományom megáll.