

Lőrincz László

Nano-biomágnesek és piezoelektromos mikrokristályok szerepe az agyi információáramlás és tárolás folyamataiban

Bevezetés

Az Univerzumot a végtelen fogalma jellemzi. A végtelen nagy, a végtelen kicsi, a végtelen bonyolult és a végtelen egyszerű. Másik jellemzője a mozgás: az anyag-, energia- és információáramlás. E három entitás létében két ellentétes tendencia észlelhető: a negentrópia és az entrópia, a rendezettség és a rendezetlenség. A megismerés kifelé, a végtelen irányába és befelé, a parányok irányába történik.

Az élő szervezetek nyílt rendszerek, állandó kapcsolatban vannak a környezettel. Az élő állapot jellemzői a szervezethez, az önszabályozás; fontos jellemzője az információ. Az információáramlás szabályozza az anyag és energia áramlását az élő szervezetek felépítésében és optimális működésében.

A negentrópia zónába tartozik az önszerveződés jelensége, ami az egész Univerzumra érvényes – adott feltételek mellett – bármely méretű anyagi összetevőre, az atomoktól a molekulákon és a bolygókon keresztül a galaxisokig, a fizikai és az élővilágra egyaránt. Az önszerveződés természetes folyamat, amelyben valamely – a környezetével kapcsolatban álló nyílt rendszer – alkotórészei közötti kapcsolatok megerősödnek, minek következtében az anyag rendezettsége növekszik.

A molekuláris önszerveződés folyamata során a molekulák vagy ezek részei spontán módon, nem-kovalens vagy gyenge kovalens erők hatására halmazokba rendeződnek, így szupermolekulák jönnek létre, amelyek szerkezetét a létrehozó molekulák szerkezete, alakja és a molekuláris kapcsolatokat kialakító vonzó és taszító erők határozzák meg. A létrejött halmazok egyensúlyi vagy metastabilis állapotban vannak. Kevésbé rendezett halmazokból rendezettebbek jönnek létre. Az önszerveződés folyadékban vagy határfelületen történő mozgás hatására jön létre, szükséges hozzá: hatóerő-kölcsönhatás, a komponensek közelsége, egyensúlyi szeparációja, amit a vonzó és taszító erők egyensúlya hoz létre, továbbá szükséges a molekulák mobilitása, amit oldatokban a hőmozgás biztosít. A folyamatra a közeg (folyadék) molekulái is hatással vannak.

A biológiában ilyen spontán önszerveződő jelenségeken alapszik a molekuláris kristályok képződése, a lipidmembránok kialakulása, vagy a polipeptid láncok csavarodása a proteinekben, a sejtek, a szervek kialakulása és maga az egész élet folyamata. Az élő állapot nagy csodája.

Élő sejtekben kimutathatók nanoméretű mágneses vas-oxid kristályok, magnetitek és piezo-elektromos mikrokristályok. A továbbiakban az élő szervezetek számára két fontos területről fogunk beszélni, I. a bio-mágnességről és II. a piezo-elektromosságról.

I. Biomágnesség

A biomágnesség ismerete nagy múltra, több mint 2000 évre tekint vissza. A legrégibb feljegyzések Kínából a Han Dinasztia idejéből (i. e. 206–AD 220) származnak. A jelenkorban elsőként Frank Anton Mesmer foglalkozott ezzel a témával.

A különféle organizmusokban – baktériumok, rovarok, madarak, halak stb. – mágneses atomokat, nano-kristályokat tartalmazó sejtek találhatóak (Joseph Kirschvink, Kaliforniai Egyetem), amelyeknek döntő szerepe lehet az *információ befogadásában, továbbításában, ezen belül az élőlények tájékozódásában*. A magnetotaktikus baktériumokat Blakemore fedezte fel 1975-ben.

Sikerült az emberi agysejtekben is kimutatni Fe_3O_4 kristályokat. Ötmillió mágneses kristály található az agy minden grammjában, 10–100 nanométer közötti átmérővel. *A biomágnesek egyik feltételezett szerepe a térbeli orientáció érzékelése*. Az élőlények tájékozódásához a megtett út mágneses adatainak felmérése, – térképezése – és ennek rögzítése is szükséges. A magnetit kristályok képesek az út mágneses információinak rögzítésére, vagy a mágneses információk (vektorpotenciál) átvitelére a sejtek információtároló részeibe. Minden valószínűség szerint az információtárolás a sejtekben és az agyban nem egyedi molekulák szintjén, hanem térszerű eloszlásban történik. A sejtekben zajló események, nano illetve szubnano szinten zajlanak, amelyeknek a törvényeit csak részben ismerjük, ezek eltérnek a makroszkopikus jelenségeket leíró törvényektől. Ezen kívül figyelembe kell venni azt is, hogy a biomágnesek in vivo, különleges összetételű folyadékban működnek.

A biomágnesek tulajdonságai

A biomágneseknél – magnetit (Fe_3O_4) kristályoknál – tökéletes anizotrópiát figyelhetünk meg, mentesek a kristályrács-hibáktól, így a stressz-anizotrópia elhanyagolható. Mágneses ellenállásuk $5 \times 10^{-5} \Omega$, amely 6000-szer jobb vezető, mint bármely más biológiai anyag.

Egy $r = 10$ nm méretű biomágnes becsült mágneses momentuma 2×10^{-16} emu. Ez elég kicsi ahhoz, hogy szobahőmérsékleten szuperparamágnesként viselkedjen. Kémiaiilag igen stabilak és ellenállóak. Általában lánc- vagy clusteralakban rendeződnek. A kristályok a sejtmembránokkal asszociáltak, azaz nyil-

vánvaló funkcionális kapcsolatnak kell lennie a membránok és a kristályok között. A biomágnesek lipid vakuolumokban alakulnak ki. Az eddig megismert biomágnesek mérete 50–500 nm. A kristályok általában kissé megnyúltak, és az (1,1,1) irányú tengely párhuzamos a hosszú tengellyel, ami a mágnesesség és alak-anizotropia iránya. Kirschvink szerint a sejtekben ionkapukat nyithatnak vagy zárhatnak, amint érzékelik a Föld különféle mágneses mezőit – *ez úton bekapcsolódva a sejt anyagcsere folyamataiba*. Ez akár elektromágneses mezők hatására is megtörténhet. Mint mágneses információ-rögzítőkről vagy átvivőkről alkotott elképzelés közelebb áll a valósághoz, mint a mechanikus szemléletű ioncsatorna szabályzás ötlete. A *nano-biomágnesek* – és másfajta, szintén az agyban található *mikro-biokristályok* – a hosszú evolúció folyamán alkalmassá válhattak bonyolult folyamatokban, mint például az *agy információ-áramlás és tárolás folyamataiban* való részvételre is.

Biomágnes források az élő szervezetekben:

1. Molekuláris szintű, önszerveződés által létrejövő mágneses szemcsék és ezek diamágneses terei.
2. Biokémiai folyamatok (szív, agy, izom és idegaktivitás) következtében kialakuló ionáramokat kísérő mágneses terek.
3. A szervezetben lévő mágneses szennyezők remanens terei (a tüdő mágneses szennyezői).

Ezek intenzitásai igen eltérőek, kb. öt nagyságrend tartományt fednek le. A legerősebb mágneses tér a tüdő ferromágneses szennyezőinek remanens tere, míg a legkisebb intenzitásúak az agy külső (hang, fény) ingerlésének hatására létrejövő mágneses terek, ezek mintegy kilenc nagyságrenddel kisebbek a Föld mágneses terénél. A biomágneses jelek detektálásakor technikai szempontból két problémát kell megoldani: egyrészt nagy érzékenységet kell biztosítani a mérendő jelek miatt, másrészt e jelekkel egy időben meglévő, de azoknál sokkal nagyobb intenzitású zavaró jeleket ki kell szűrni. Ezért egy speciális kiképzésű antennát kell használni, mely csak a mérhető jelet érzékeli, minden más jelre érzéktelen.

Mágneses tér kimutatása élő szervezetekben

A ma ismert legérzékenyebb mágneses térmérő műszer a SQUID, (*szupravezető kvantum interferométer*, angol nevén *Superconducting Quantum Interference Device*), melynek segítségével kisméretű és igen gyenge mágneses terek, így az élő szervezetek mágneses aktivitása is nagy pontossággal detektálható. Működése a szupravezetésen és a Josephson effektuson alapul.

- A szupravezetés a fémeknek az abszolút nulla fok közelében (–273C) létező állapota. Legismertebb megnyilvánulása a zérus elektromos ellenállás.
- A Josephson-effektus segítségével a szupravezetőkben – a fény interferenciájához hasonlóan – elektronhullám interferenciát lehet létrehozni, és az erősítés vagy gyengítés állapota érzékenyen függ a külső mágneses tértől.

A SQUID technológia minden olyan területen alkalmazható, amely mágneses tér mérését jelenti, vagy mágneses tér mérésére vezethető vissza. Alkalmazásának további lehetőségei: az izomrostok aktivitásának, az idegrost ingerületvezetési képességének, vagy a máj vastartalmának a vizsgálata.

Az agy mágneses terének vizsgálata MEG (magnetoencefalogram) segítségével: nem igényel elektródokat, nagyon jó feloldást tesz lehetővé, mélyebb rétegekből is nyújt információkat, lehetővé teszi a sztatikus jelek detektálását is.

Az agy mágneses jelei (MEG) különböznek az elektro-encefalogram (EEG) jeleitől.

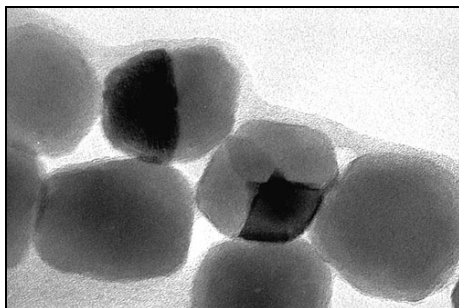
A szív mágneses terének vizsgálata: Az MKG (magneto-kardiogramm) a szív mágneses terének időbeli változásait leíró görbe a depolarizációs frontot kísérő tér vándorlásával van kapcsolatban.

A szem mágneses terének vizsgálata: a SQUID magnetométert sikeresen lehet alkalmazni a látás mechanizmusának vizsgálatára, ezen belül a következőket lehet vizsgálni:

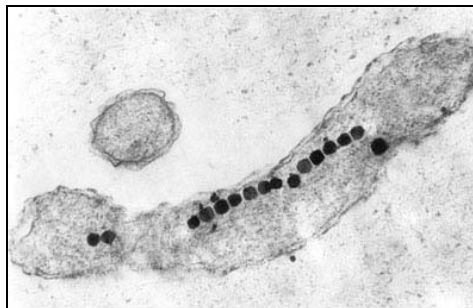
1. a szem miniatűr mechanikai mozgását a kontaktlencsére helyezett pici mágnesekkel,
2. a fény hatására a retinán kialakuló elektromágneses jeleket,
3. az agy látási központjának jeleit.

Magnetotaktikus baktériumok

A mikro-gravitáció hatással van a magnetotaktikus baktériumokra. Ugyanakkor képesek a mágneses energiát kinetikus energiává alakítani. Ezek közül megemlítjük a *Magnetospirillum magnetotacticum*, *Aquaspirilla magnetotacticum* fajokat, amelyeket Blakemore fedezett fel 1975-ben.



1. ábra.
Magnetit kristályok felnagyítva



2. ábra. *Magnetospirillum, magnetotacticum*
magnetit kristályokkal

Gerinceseknél a magnetit részecskék az olfaktív epitéliumban, a lamina propriaiban találhatóak. Mágneses aktivitás transzmembrán ion-kanálison is létrejöhet (Urban, 1998).

Mágneses rezonancia

A mágnességre alapozott eljárásokat neves kutatók olyan irányba fejlesztették, hogy segítségükkel az élő szervezet anatómiájáról igen részletes térbeli képet lehet nyerni, nem invazív módon (behatolás nélkül), és ártalmatlanul, amit az orvosi gyógyászatban igen hatásosan lehet felhasználni. Megfigyelték, hogy erőteljes mágneses térben az atommagok spinjei felveszik a tér irányát. Ebben az állapotban a rájuk jellemző frekvenciájú sugárzással gerjeszthetők. A gerjesztés során felvett energiát lassan, hasonló módon leadják. Ezt az energiát elektronikus-számítógépes rendszer érzékeli, felerősíti, értelmezi. Ezekből az információkból nagyon pontosan behatárolható a meghatározott állapotú atomok elhelyezkedése. Az élő szervezetben nagy mennyiségben előforduló víz molekulákban igen jól gerjeszthetőek a hidrogén atommagok. Kontrasztanyagokat (gadolínium) alkalmazva bizonyos részletek láthatóvá válnak. A vérbe juttatott mágneses tulajdonságú anyagokkal tökéletesen feltérképezhetők a legapróbb részletek, mint az erek, vagy a vér áramlásának tulajdonságai is (Lauterburg). Matematikai eljárásokkal (Fourier módszer) el lehet különíteni az egyes részecskékről jövő jeleket, ezáltal anatómiailag hű és jó felbontású teljes háromdimenziós képet lehet felépíteni. (A mágneses rezonancia felfedezéséért fizikai Nobel-díjat kaptak F. Bloch és F. M. Purcel 1952-ben, majd a gyógyászatban való felhasználásban elért eredményekért – MRI (Magnetic Resonance Imaging) – mágneses rezonanciás leképezés – orvosi Nobel-díjat 2003-ban P. C. Lauterburg, amerikai kémikus és Sir P. Mansfield angol fizikus).

II. Piezoelektromosság

A piezoelektromosság, bizonyos nem centrálszimmetrikus kristályok – kvarc, turmalin, bárium-titanát –, azon tulajdonsága, hogy nyomásra deformálódnak és polarizálódnak, vagyis a kristályok felületén a deformáció hatására töltések jelennek meg.

A jelenség fordítottja az elektrostrikió: elektromos térben, ennek igen kis változásaira a kristályok ellaposodnak, illetve kiterjednek, ami polaritásfüggő jelenség. Ezek a változások rendkívül gyorsak és pontosak, ebből vibráció alakul ki. Így igen nagy pontosságú, akár néhány nanométer átmérőjű felületek pásztázására is kiválóan alkalmasak, ezen alapszik a kvarc órák működése. E jelenség felfedezése Pierre Curie és Marie Curie-Sklodowska nevéhez fűződik.

Piezoelektromos mikrokristályok

Pásztázó elektronmikroszkópos (SEM, Scanning Elektron Microscope) felvételek szerint a kristályok asszociátumokat képeznek a sejtmembránokkal. Ez azt jelenti, hogy funkcionális kapcsolat lehet a membránok és mikrokristályok között. A kristály-összetétel vizsgálata meglepő eredményeket hozott. Nézzünk meg két, a tobozmirigy sejtekben talált kristály összetételét: Az egyik esetben: 3,4% Al, 32,9% Si, 1,3% Cl, 10,4% K, 2,5% Ti és 9,5% Zn, és a másik szokatlan kristály-összetétel: 5,3–8% Al, 29,8–31,4% P, 6,7–14,9% S, és 48,4–55,5% Ca.

Kimutatható a mikrokristályok jelenléte a tobozmirigyben, ami bizonyítottan fotoreceptor (néhány állatnál), és feltehetően mágneses receptor is, melynek aktivitását a fény szabályozza. A legtöbb organizmusban a tobozmirigy viszi át a retinától kapott idegi stimulációt. (A tobozmirigyben melatonin termelődik a retina és a hipotalamusz által szabályozott módon.) A melatoninnak szignifikáns hatása van az endokrin rendszerre, és koncentrációja követi a cirkadián (nappal-éjjel) ritmust. Képes hatni a sejtproliferációra, sejt differenciációra, sejt kontaktusra, és a sejtek közötti interkommunikációs folyamatokra. Ezen tulajdonságok miatt kiemelt figyelmet kap a tobozmirigy kutatása.

SHG (*second harmonic generation*) módszerrel kimutatták, hogy a tobozmirigy szövetek egyértelmű piezoelektromos aktivitást mutattak. A többi agyterület-ről származó szövetek esetében is lényeges piezoelektromos aktivitást mértek, bár a SEM elektronmikroszkópos felvételek csak a tobozmirigyben és a hipofízisben mutattak ki kristályokat. A vizsgált szövetek 1,0–5,5% μg alumínium/g-szövet tartalmaztak. Feltételezhető, hogy *korreláció létezik a szövetek alumínium tartalma és a piezoelektromos aktivitás között*. Felmerül a kérdés, hogy ha a mikrokristályoknak a sejtekben funkcionális szerepük van, tehát lényegesek az információátvitel vagy -feldolgozás szempontjából, akkor lehetséges, hogy az agy szöveteiben kimutatott alumíniumnak szerepe lehet az Alzheimer kór kialakulásában!

Lehetséges, hogy az alumínium mennyisége és beépülésének módja befolyásolja a kristályok felépülését, s ezen keresztül az információ-feldolgozást, amely molekuláris szinten létrehozhatja e rettegett betegséget? Akárhogy is, az alumínium, mint egyik lehetséges tényezője az Alzheimer kórnak, még nem elvetett gondolat.

Van egy olyan elképzelés, miszerint a kristályok piezoelektromos aktivitással valószínűleg képesek felületi diszperzió indukálására, vagy ennek megváltoztatására azáltal, hogy a kristályok asszociátumokat képeznek a membránokkal, így a membránmozgások piezoelektromos aktivitást indukálhatnak. Vagy fordítva: az elektromos mező deformációt okozhat a kristályokon (elektrosztrikció), amely hathat a membránokra. Ezúton elektromos vagy mechanikus változások regulálhatják a metabolizmust másodlagos intracelluláris messengerek (ionkapuk szabályozása) útján. Akárhogy is, a mikrokristályok piezoelektromos aktivitásának szerepe még ismeretlen.

Felmerül a kérdés, hogy a szokatlan összetételű és piezoelektromos aktivitású mikrokristályoknak kell, hogy legyen funkciójuk a sejtekben és az agyban. Úgy

tűnik, hogy az élő sejtek koherens rezgéseket, biofotonokat képesek produkálni. Ennek egyik lehetséges realizációja a kémiai lézer effektus, azaz a természetes reakcióknál felszabaduló energia koherens hullámokat alkot.

Az elektromágneses hullám főleg a membránok mentén hat. Így az elektromágneses információk szintén hatást gyakorolhatnak a mikrokristályokra, mivel a kristályok asszociátumot képeznek a membránokkal. Másik lehetőségként merül fel, hogy az elektromágneses sugárzás akár közvetett úton is megváltoztathatja a kristályképződés kinetikáját, ahogy ez *in vitro* is kimutatható. A sejtek által előállított koherens hullámok a külső és belső információktól függően alakulnak ki. A sejtek önszervező módon mikroelemekből piezoelektromos mikrokristályokat produkálnak. Akárhogy is, minden feltétel adott egyfajta holografikus információrögzítéshez.

A sejtek különféle szerves és szervetlen nano és szubnano kristályokat tartalmazhatnak, amelyeknek lényeges funkciójuk kell legyen. Ne felejtjük el, hogy a szerves evolúció egy „szervetlen evolúcióra” épült.

Összefoglalás

Ma már bizonyított tény a mágneses nanokristályok és elektromos mikrokristályok jelenléte különféle élő szervezetekben (baktériumok, rovarok, halak, madarak, emlősök stb.). Ezeknek döntő szerepe lehet a Föld mágneses mezőinek érzékelésében, az élőlények térbeli orientációjának megvalósításában. A tájékozódáshoz szükséges az út mágneses adatainak (térképének) rögzítése. Feltételezhető, hogy a sejtekben önszerveződő módon kialakult mikrokristályok (piezoelektromos mikrokristályok – Al, P, Si, Cl, K, Ti, Zn, S, Ca) és nanokristályok (magnetit/gregit kristályok F^3S^4), képesek az út mágneses információinak rögzítésére, vagy a mágneses információk (vektorpotenciál) átvitelére a sejtek információ-tároló részeibe. Tekintetbe kell venni, hogy a sejtekben zajló események nano- illetve szub-nano szinten zajlanak, amelyeknek törvényeit messze nem ismerjük még. A nanoméretű folyamatok felfedezett törvényszerűségei azt jelzik, hogy számos olyan folyamat létezik, mely alkalmas a szervetlen és szerves anyagok közötti információáramlás biztosítására. A sejtekben minden információs folyamat eleve önmagába visszacsatolt. A természetben minden folyamat kooperatív, ez teszi lehetővé, hogy a kinetikai szintű információk termodinamikai szinten megjelenjenek. A biomágnesek a sejtekben önszerveződő módon épülnek fel, lipid vakuolumokban alakulnak ki, tökéletes az anizotropiájuk, mentesek a kristályrács-hibáktól, mágneses ellenállásuk kicsiny, kb. 6000-szer jobb vezető, mint bármely biológiai anyag, kémiaiilag igen stabilak és ellenállóak. A kristályok a sejtmembránokkal asszociáltak, azaz nyilvánvaló funkcionális kapcsolatnak kell léteznie a membránok és a kristályok között. Az eddig megismert biomágnesek mérete 50–500 nm. Feltételezhető, hogy a sejtekben ionkapukat nyit-

nak meg, vagy zárhatnak – ezúton bekapcsolódva a sejt anyagcsere-folyamataiba. A piezoelektromos kristályok az elektromosság igen csekély változásaira gyorsan és igen pontosan kiterjednek ill. összehúzódnak, ami polaritásfüggő jelenség. Elképzelhető, hogy a biomágnesek és másfajta, az agyban található biokristályok az evolúció folyamán alkalmassá váltak komplexebb folyamatokban való részvételre, így az idegrendszer információ-áramlásának és -tárolásának folyamataiban is.

Nemrégiben igazolták ecetmuslicákon (*Drosophila*) végzett kísérletekben, hogy a cryptochrom [ultraibolya (UV) és kék] fotoreceptorok médiálják a mágneses recepciót (magnetorecepció). A legyek csak akkor válaszolnak mágneses ingerekre, ha teljes spektrumú fény van jelen, ha az UV/kék fényt kiszűrik, akkor nem. Ennek az eredménynek ellenőrzése végett, ha genetikailag módosított legyekben a cryptochrom gént kiütötték, akkor nincsen semmiféle mágneses válasz, függetlenül attól, hogy milyen fényben vizsgálják. (Gegeer et al, Nature, 2008).*

Irodalom

- FRANKEL, R. B.–PAPAELFTHYMIU, G. C. and WATT, G. D.: Variation as Super paramagnetic Properties with Iron Loading in Mammalian Ferritin. *Hyperfine Interactions* 66, 71/82 (1991).
- GALAMBOS R., JUHÁSZ G., LŐRINCZ L. M., SZILÁGYI N. (2006) The human retinal functional unit. *International Journal of Psychophysiology* 57(3):187–94.
- HUGHES S., LŐRINCZ L. M., COPE D., BLETHLYN K., KÉKESI K., PARRI R. és CRUNELLI V. (2004) Synchronized oscillations at alpha and theta frequencies in the lateral geniculate nucleus. *Neuron* 42(2):253–68.
- LOHMANN J. (2000) Magneto-reception, *TINS*, vol 23, No. 4. 153–159.
- LOHMANN, K. J. and JOHNSEN, S. (2000). The neurobiology of magnetoreception in vertebrate animals. *TINS* 24: 153–159.
- LŐRINCZ L. M., OLÁH M., BARACSKAY P., SZILÁGYI N. és JUHÁSZ G. (2007) Propagation of spike and wave activity to the medial prefrontal cortex and dorsal raphe nucleus of WAG/Rij rats. *Physiology and Behavior* 90(2–3):318–24.
- URBAN, J. E. 1998. Microgravity effects on magnetotactic bacteria, *Space Technol. Appl. Int. Forum*, 1998. Am. Inst. Physics. Conf. 420, Albuquerque, NM, January 25/29. pp 761–764.
- MAGOR L. LŐRINCZ, VINCENZO CRUNELLI, STUART W. HUGES (Cardiff Univ. UK), Cellular Dynamics of Cholinergically Induced α (8–13 Hz) Rhythms in Sensory Thalamic Nuclei, *In Vitro*, *The Journal of Neuroscience*, January 16. 2008–28(3) 660–671.
- RITZ, T., ADEM, S. AND SCHULTEN, K. (2000). A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal* 78, 707–18.

* Kutatásaink folytatásában az évek folyamán nagy segítséget kaptunk, és köszönetünket fejezzük ki ezúton is: Dr. Berényi Dénes atomfizikus professzornak, a MTA tagjának, a debreceni ATOMKI (Atommagkutató Intézet) korábbi vezetőjének, Dr. Mészáros Sándor fizikusnak, az ATOMKI volt igazgatóhelyettesének, hasznos tanácsaikért, útmutatásaikért és támogatásukért, Dr. Matskási Istvánnak, a Budapesti MTT Múzeum főigazgatójának, Dr. Mészáros Ferencnek, a MTTM főigazgató helyettesének. Mark Gerstein professzornak, Gerstein Laboratorium, Bio-info. Csoport, Yale Univ. USA, Dr. Juhász Gábor professzornak, Elektrofiz. Lab. ELTE-MTA, Budapest., Lőrincz L. Magor neurobiológusnak, School of Biosciences, Cardiff University, UK, Prof. Dr. phil. Ulf Hedetaft, The Academy for Migration Studies in Denmark, Prof. Dr. Mike Paulin, Univ. Of Otago, Dunedin, New Zealand.

- SCHULTEN, K. AND WINDEMUTH, A. (1996). Model for a physiological magnetic compass. In *Biophysical effects of steady magnetic fields*, eds. G. Maret J. Kiepenheuer and N. Boccara), Berlin: Springer-Verlag. pp. 99–106.
- SEMM, P. AND BEASON, R. C. (1990). Responses to small magnetic variations by the trigeminal system of the bobolink. *Brain Res. Bull.* 25, 735–740.
- WALKER, M. M., DIEBEL, C. E., HAUGH, C. V., PANKHURST, P. M., MONTGOMERY, J. C. and GREEN, C. R. (1997). Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 390, 371–376.

Jegyzetek

- **SQUID**, Brian Josephson, fiatal doktorandus hallgató a Cambridge egyetemen mutatta be az „alagút”-hatás létezését és különleges tulajdonságait (1962): – *Ha két szupravezető anyagot elválasztunk egy vékony szigetelő réteggel (Josephson csatlakozó) az elektronok a szigetelő anyagon keresztül az egyik anyagról a másikra áramolhatnak, még külső feszültség hiányában is. Ez a tény lehetőséget biztosít arra, hogy a leggyengébb mágneses mezőt is ki lehessen mutatni.* Ez a felfedezés egy új technológia magja lett, amit SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) néven ismerünk. Úgy működik, hogy párhuzamosan kötünk két Josephson csatlakozót. A szupravezető hurokban még a nagyon gyenge mágneses mező is elektromosan mérhető jelet ad.
Miért válik egy anyag szupravezetővé, amikor megközelíti az abszolút zéró fokot? 1957-ben J. Bardeen, L. Cooper és J. Schrieffer kidolgozták a szupravezetés elméletét (alacsony hőmérsékletű szupravezetők – BCS, kezdőbetűik után): extrém hideg esetén, nagyon alacsony kritikus hőmérsékleten változások történnek a *kristály struktúra atomjainak vibrációiban és energiaszintjeiben*. Ebben az állapotban az általános taszító erő az elektronok között megszűnik és azok párba rendeződve, ellenállás nélkül mozognak. Nagy energia megtakarítás. Azóta felfedezték a magas hőmérsékletű szupravezetőket is (1986).
- **Genom.** Az élő szervezet teljes öröklött információja. A humán genom kb. 32-ezer génjéhez kb. 250–300 ezer fehérje tartozik, amelyek transzkripciós, illetve translációs reguláció és poszt-transzlációs modifikáció révén jönnek létre (jelátviteli hatás). E fehérjék 20–25%-a vesz részt a jelátvitelben.
- **Érzékelések az állatvilágban:** rezgésérzékelés a pókoknál, infravörös fényt érzékelnek a bagolyfélék, cápák, kígyók, macskafélék.
- **A sejtek közötti kommunikáción** egy olyan interaktív-kooperatív jelátadási folyamatot értünk, amely molekuláris vagy sejtválaszt indukál. Így jön létre az interaktív kommunikáció.
- **Az információ-tárolás** molekuláris szintű mechanizmusa a mai napig nem teljesen tisztázott probléma. A *szinaptikus plaszticitás* valamint a *holografikus elmélet* áll a legközelebb ennek tisztázásához. A holografikus elmélet szerint az információtárolás során az egyedi idegsejt (elektromágneses hullámok és sejtek közötti kölcsönhatások révén) érzékeli az egész agy ingerületmintázatát és így leképződik benne, és innen elő is hívható. (Hasonlóan a holografikus képhez, ahol minden elem benne van az egész információja.)
- **Ellenállás és áramerősség értékek:** Elke Scheer és munkatársai (Karlsruhei Egyetem) két makroszkopikus vezetőt egyetlen atommal kötöttek össze, és mérték az ellenállás-, ill. az áramerősség értékeket. Az eredmények megdöbbentőek voltak. Az egyatomos ólom jobb vezető volt mint az egy atomos arany, pedig makroszkopikus szinten az arany tízszer jobb vezető mint az ólom. Meglepő eredményeket hozott az áramerősség mérése is. Az egyetlen atomból álló érintkező 100 mikroampert volt képes elviselni. Ez olyan mintha 1 mikrométeres huzal 1 milliárd amper áramerősséget bírna ki. Az eredményeket kvantummechanikai alagúthatással magyarázták.