

# *Magyar Tudomány*

**BEMUTATKOZIK AZ MTA XI.  
(FIZIKAI TUDOMÁNYOK) OSZTÁLYA**

Vendégszerkesztő: Jéki László

125 éve született Bartók Béla  
Gondolatok a matematikáról  
Lax Péter élete és munkássága

---

**2006 • 5**

---

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA FOLYÓIRATA. ALAPÍTÁS ÉVE: 1840  
167. ÉVFOLYAM – 2006/5. SZÁM

*Főszerkesztő:*

CSÁNYI VILMOS

*Vezető szerkesztő:*

ELEK LÁSZLÓ

*Olvasószerkesztő:*

MAJOROS KLÁRA

*Szerkesztőbizottság:*

ÁDÁM GYÖRGY, BENCZE GYULA, CZELNAI RUDOLF, CSÁSZÁR ÁKOS, ENYEDI GYÖRGY,  
KOVÁCS FERENC, KÖPECSI BÉLA, LUDASSY MÁRIA, NIEDERHAUSER EMIL,  
SOLYMOSI FRIGYES, SPÁT ANDRÁS, SZENTES TAMÁS, VAMOS TIBOR

*A lapot készítették:*

CSAPÓ MÁRIA, GAZDAG KÁLMÁNNÉ, HALMOS TAMÁS, JÉKI LÁSZLÓ, MATSKÁSI ISTVÁN,  
PERECZ LÁSZLÓ, SIPOS JÚLIA, SPERLÁGH SÁNDOR, SZABADOS LÁSZLÓ, F. TÓTH TIBOR

*Lapterv, tipográfia:*

MAKOVECZ BENJAMIN

*Szerkesztőség:*

1051 Budapest, Nádor utca 7. • Telefon/fax: 3179-524

matud@helka.iif.hu • www.matud.iif.hu

Kiadja az Akaprint Kft. • 1115 Bp., Bártfai u. 65.

Tel.: 2067-975 • akaprint@akaprint.axelero.net

Előfizethető a FOK-TA Bt. címén (1134 Budapest, Gidófalvy L. u. 21.);  
a Posta hírlapüzleteiben, az MP Rt. Hírlapelőfizetési és Elektronikus  
Posta Igazgatóságánál (HELP) 1846 Budapest, Pf. 863,  
valamint a folyóirat kiadójánál: Akaprint Kft. 1115 Bp., Bártfai u. 65.

Előfizetési díj egy évre: 6048 Ft

Terjeszti a Magyar Posta és alternatív terjesztők

Kapható az ország igényes könyvesboltjaiban

Nyomdai munkák: Akaprint Kft. 26567

Felelős vezető: Freier László

Megjelent: 11,4 (A/5) ív terjedelemben

HU ISSN 0025 0325

---

---

# TARTALOM

## *Kulcs a természet megismeréséhez*

### *Bemutatók az MTA XI. (Fizikai Tudományok) Osztálya*

Faigl Gyula: Előszó .....	522
Balog Erika – Fidy Judit: A genomikától a proteomikáig és a molekuláris dinamikáig ...	526
Domokos Péter: Az atom-foton molekula .....	531
Fodor Zoltán: Az erős kölcsönhatás fázisdiagramja .....	536
Gránásy László – Pusztai Tamás – Tegze György: Polikristályos megszilárdulás számítógépes modellezése .....	539
Groma István – Lendvai János – Ungár Tamás: A röntgendiffrakciós spektrum mint a mikroszerkezet ujjlenyomata .....	544
Horváth Dezső: Szuperszimmetrikus részecskék keresése a CERN-ben .....	550
Kamarás Katalin: Szén nanocsövek optikai spektroszkópiája .....	555
Kertész János – Vicsek Tamás: Komplex hálózatok a természetben és a társadalomban .....	558
Kolláth Zoltán: Rezgések együtthangzása – a csillagbelső diagnosztikája .....	565
Lévai Péter: Kvar-k-tomográfia: femtométeres anyagninták vizsgálata a magfizikában .....	569
Maróti Péter – Gerencsér László: Protonvezetés fehérjékben .....	575
Ricz Sándor: Új jelenségek az atomi fotoelektronok szögeloszlásában .....	579
Surján Péter: Útban az óriásmolekulák felé: „lineárisan skálázódó” elméleti kémiai módszerek .....	585
Szegő Károly: Úrkutatás – ürtevékenység – úrfizika .....	589
Temesvári Tamás – Tél Tamás: Rendezetlenség, komplexitás és káosz: mindennapos fogalmak a modern statisztikus fizikában .....	593

### *125 éve született Bartók Béla*

Számomra minden nap Bartók-évforduló Teimer Gábor beszélgetése Kocsis Zoltán zongoraművésszel .....	598
Wilheim András: Az ismeretlen Bartók .....	603

### *Tanulmány*

Kroó Norbert: Néhány gondolat a matematikáról .....	610
Fritz József: Lax Péter életéről és munkásságáról .....	614

### *A jövő tudósai* .....

### *Megemlékezés*

Szablya János Ferenc ( <i>Helen Szablya</i> ) .....	625
---	-----

### *Kitekintés (Jéki László – Gimes Júlia)* .....

### *Könyvszemle (Sipos Júlia)*

Honismeret felsőfokon ( <i>Nagy Miklós Mihály</i> ) .....	631
Kiss Elemér: Matematikai kincsek Bolyai János kéziratos hagyatékából ( <i>Dénes Tamás</i> ) ...	634
Monológ helyett dialógus: két kötet szemléje ( <i>Balogh Tibor</i> ) .....	636
Járjuk körül a tudományt! ( <i>Szentgyörgyi Zsuzsa</i> ) .....	638
Dr. Buda Béla: Pszichoterápia ( <i>Duró Zsuzsa</i> ) .....	640
Sült galamb? ( <i>Mészáros András</i> ) .....	641
Bertók Lóránd – Donna E. Chow: Természetes immunitás ( <i>Petrányi Győző</i> ) .....	643
Kefi, az építész ( <i>Simon Mariann</i> ) .....	646

*Kulcs a természet megismeréséhez*  
*Bemutatkozik*  
*az MTA XI. (Fizikai Tudományok) Osztálya*

**ELŐSZÓ**

Faigel Gyula

az MTA levelező tagja, osztályelnök-helyettes  
MTA SZFKI – gf@szfki.hu

A fizika célja az anyagi világ legalapvetőbb törvényeinek, működésének feltárása, megértése. Fontos, hogy a megértés szintje olyan legyen, hogy az összefüggéseket kvantitatívan és egzaktul le tudjuk leírni. Ezért a fizika erősen támaszkodik a matematikára. A fentiekből azt a következtetést is levonhatnánk, hogy a fizika lényegében mindenfelé foglalkozik. Azonban ez nem így van: az anyag magasabb szerveződési formáit (biológiai, társadalmi stb.) és az azokból adódó speciális kérdéseket külön diszciplínák kutatják. Ennek oka, hogy e területek törvényei más jellegűek, mint a fizikában általában, nem tehetők eléggé kvantitatívá, illetve egzaktá. Azonban a fizika e területek fejlődéséhez is jelentősen hozzájárul. Éppen az utóbbi évtizedekben erőteljes fejlődés zajlott a fizika olyan területein, gondolok itt elsősorban a statisztikus, illetve matematikai fizikára, amelyek komoly segítséget nyújtanak más diszciplínák problémáinak tárgyalásához, megértéséhez.

Bemutatkozik a Fizikai Tudományok Osztálya. Nos, a fenti pár mondatos általános bevezetőből is sejlik: nehéz egy olyan osztályt bemutatni, amelynek kutatási területe

olyan széles, mint a Fizikai Tudományok Osztályaé: térben a legkisebb elemi részecskéktől a Világegyetem egészéig terjed, és időben is hatalmasterület – az Ősrobbanástól a jelenig – fed le. Módszereiben is igen változatos a fizika. Sok száz vagy inkább ezer kísérleti technika és hasonlóan sok elméleti megközelítés próbálja a fent említett hatalmas kutatási területet feldolgozni, úgy, hogy a megismerés egészen a megértés szintjéig terjedjen.

Mit várunk el a Fizikai Tudományok Osztályától? Az általános elvárás a tudományágra lebontva hasonló, mint amit az Akadémia egészétől is elvárhat a társadalom. Ez nem más, mint az, hogy valamilyen szinten minden tudományágnak a világon felhalmozott összes ismeretanyagát lefedje, mintegy tárháza legyen a tudásnak, s e tárházból az ország meríthessen. Ugyanakkor nemcsak egy passzív tárház, hanem egy olyan aktív kutatókból álló közösség, amely hozzá is tesz ehhez a tudáshalmazhoz saját kutatásai révén, ezzel emelve az ország nemzetközi elismertségét. Ennek megfelelően az Akadémia és ezen belül a Fizikai Tudományok Osztályának feladata az alap kutatás, új ismeretek szerzése, összefüggések feltárása, megértése.

A Fizikai Tudományok Osztálya szerkezete tükrözi az előzőleg megfogalmazott kívánalmakat. Kilenc bizottságból épül fel, amelyek átfogják a fizikai kutatások teljes skáláját. A bizottságok tagsága nemcsak az akadémiai fizikai kutatóintézetekből kerül ki, hanem felölel mindenkit, aki Magyarországon fizikai kutatásokkal foglalkozik.

E bemutatkozó szám cikkeit úgy válogattuk össze, hogy minden bizottság területéről egy-két érdekes, aktuális, a szélesebb olvasóközönséget is érdeklő eredményt mutassunk be. Tizenöt cikket olvashatunk e számban. Bár a szerzők erre külön nem tértek ki, de itt szeretném megemlíteni, hogy minden szerző aktív kutató, akinek saját eredményei is ott szerepelnek a cikkekben. Természetesen ezek az eredmények az érthetőség kedvéért be vannak ágyazva a világon e területeken elért eredmények közé. A következőkben minden cikkről egy igen rövid ismertetőt szeretnék adni, evvel segítve a nem fizika területén dolgozó olvasót a könyv-nyebb tájékozódásban. Szerzői névsor szerint fogok haladni.

Balog Erika és Fidy Judit cikke egy interdiszciplináris területre, a biofizika területére kalauzolja az olvasót. Arról írnak, hogy az élő szervezetek alkotóinak molekuláris szintű ismerete miért fontos. Cikkükben elsősorban a fehérjékre és azok dinamikájára koncentrálnak. Megmutatják, hogy a fizikában és kémiában kidolgozott molekuladinamikai módszereket sikerrel alkalmazhatjuk egyszerű fehérjék viselkedésének leírására is.

Domokos Péter az anyag és fény speciális körülmények között (rezonátorban) való kölcsönhatása eredményeként létrejövő új jelenségeket és az ezekből fakadó elméleti és gyakorlati lehetőségeket tárgyalja.

Fodor Zoltán igazi „kemény” fizikai problémát tárgyal. Annak a lehetőségét vizsgálja, hogy magának a részecskefizika elméletének – az erős kölcsönhatás elméletének – fázisdiagramját hogyan határozhatjuk meg. Rámutat,

hogy a fizikában szokásos perturbatív módszerek helyett ez esetben a ráctérelmélet segítségével juthatunk el a megoldáshoz.

Gránásy László, Pusztai Tamás és Tegze György egy, a gyakorlati élettel szorosan kapcsolatos kérdést, a polikristályos anyagok kialakulását vizsgálják egy általuk kidolgozott elméleti megközelítés segítségével. Mivel a minket természetben körülvevő, illetve az emberiség által mesterségesen előállított anyagok egy igen jelentős része polikristályos, ezen anyagok növekedési mechanizmusának ismerete alapvető. Cikkükből megtudjuk, hogy milyen sokféle és bonyolult mikroszerkezeti mintázat alakulhat ki, és bemutatják, hol tart ezek leírása, megértése.

Groma István, Lendvai János és Ungár Tamás cikke bemutatja, hogy a kristályok rendezett atomi szerkezetében előforduló hibákat hogyan tudjuk röntgensugárzás segítségével felderíteni. Több érdekes példát mutatnak arra, hogy ez az információ mely területeken lehet fontos.

Horváth Dezső cikkéből megtudhatjuk, hogy milyen formában kapcsolódnak be a magyar kutatók a kísérleti részecskefizikába, elsősorban a CERN-ben folyó kutatásokba. A legaktuálisabb kutatási problémák mellett megdöbbentő adatokat olvashatunk a kísérletekben használt berendezésekről. Ki gondolná például, hogy az itt használt szupravezető mágnest több vas veszi körül, mint amennyi az Eiffel-toronyban van.

Kamarás Katalin a napjainkban igen nagy erővel kutatott, szénatomokból felépített molekuláris méretű, tehát nanométer átmérőjű csövek, úgynevezett szén nanocsövek optikai rezgési spektroszkópiás vizsgálatáról ír. Az így szerzett adatok lehetőséget adnak a nanocsövek viselkedésének leírására alkotott elméleti elképzelések ellenőrzésére, és végső soron a későbbi biztonságos gyakorlati alkalmazásokra.

Kertész János és Vicsek Tamás a hálózatról ír. Ha a hétköznapi életben meghalljuk

a hálózat szót, először a *world wide web* (www) jut mindenki eszébe. A cikkből megtudhatjuk, hogy a körülöttünk lévő világ jelenségeinek sokkal szélesebb körét értelmezhetjük hálózatként is. Hálózatok előfordulnak a biológiától a társadalmon keresztül a kémiáig, fizikáig mindenütt. A szerzők rávilágítanak, hogy hazánkban komoly hagyományai vannak e terület vizsgálatának, és ma is jelentős eredményeket érnek el kutatóink.

Kolláth Zoltán szemléletes képeken keresztül mutatja be, hogy a csillagok rezgéseiből hogyan kaphatunk információt a felépítésükről. Azt gondolhatnánk, hogy csak a nap rezgéseit tudjuk mérni, de kiderül, hogy távoli társai fényerő-ingadozása is tükrözi rezgéseiket. Ez lehetőséget nyújt a csillagok felépítéséről való általánosabb kép kialakításához.

Lévai Péter a nagyenergiás részecskefizika egyik aktuális területéről, a nehézion-ütközésekről ad ízelítőt. Meglepődve olvashatjuk, hogy az orvosi gyógyászatból jól ismert tomografikus eljárás az atommagok nagyon kis méretskáláján is alkalmazható. E cikkből megtudjuk, hogyan működik a kvark tomográfia, és a részecskefizika mely kérdéseire remélhetünk választ e módszer alkalmazásával.

Maróti Péter és Gerencsér László a biológiai rendszerekben fontos folyamat, a protonvezetés mechanizmusáról írnak. Elsősorban a fotoszintetikus baktériumok reakció-centrumában lezajló vezetésre koncentrálnak. Elmagyarázzák, hogy az itt működő fehérjék, mint például a bakteri-*orodopszin*, hogyan alakít ki protonkoncentráció-különbséget egy biomembrán két oldala között.

Ricz Sándor a fotóeffektussal – az atomi elektronok fotonokkal való kilökésének problémájával – foglalkozik. Meglepő, hogy ezt az effektust Albert Einstein éppen száz éve, 1905-ben magyarázta meg, és még ma is vannak ezzel kapcsolatos nyitott kérdések.

A szerző azt taglalja, hogy a debreceni ATOMKI-ban kifejlesztett elektronspektrométer milyen új lehetőségeket kínál a fotóeffektus vizsgálatára.

Surján Pétertől egy, az anyagtudomány, kémia, és biológia számára egyaránt nagyon fontos területről, a molekulák felépítésének első elvekből való modellezéséről kapunk összefoglalót. Tudjuk, hogy a fizika törvényei elvileg lehetővé teszik, hogy az alkotóelemek ismeretében meghatározzuk egy molekula szerkezetét. A szerző megvilágítja, hogy a gyakorlatban ez miért nem megy, és rámutat a problémák kiküszöbölésének egy lehetséges módjára.

Szegő Károly bemutatja, hogy merre tart az európai úrkutatás, és hogyan kapcsolódik Magyarország ehhez a programhoz. Megtudhatjuk, hogy egy ilyen kis ország, hogyan járulhat hozzá egy igen pénzigényes kutatáshoz, milyen nagy szerep jut ebben a hagyományoknak. A szerző arra is kitér, hogy mit kaphat az emberiség e kutatásoktól.

Temesvári Tamás és Tél Tamás a rendezetlen rendszerek egy olyan csoportját mutatják be, amely tér- és időbeli viselkedése sajátosságok szabályokat mutat, kaotikus. Egy közelítő definíciót kapunk arra, hogy mit nevezünk kaotikus viselkedésnek, mik ennek legfőbb jellemzői. A szerzők jó néhány, hétköznapi életünkben vett példán keresztül világitanak rá e terület fontosságára.

Úgy gondolom, a bemutatkozáshoz hozzá tartozik az Osztály múltja és hétköznapijai. Befejezésként ezekről írnék néhány mondatot. A Fizikai Tudományok Osztálya mint önálló egység, fiatal. 1993-ig a Matematikai Tudományok Osztályával együttesen alkoták a Matematikai és Fizikai Tudományok Osztályát. Szétválásunk után először Nagy Károly, majd 1999-től Bor Zsolt volt, 2002-től napjainkig pedig Horváth Zalán a Fizikai Tudományok Osztályának elnöke. Az Osztály rendes tagjainak száma húsz, a levelező

tagoké kilenc, a külső tagoké tizennyolc és a tiszteleti tagoké tizenöt. Aktívan részt veszünk az Akadémia életében: a különböző akadémiai bizottságokban, Osztályunkról került ki az MTA főtitkára is az elmúlt hat évben, többen tagjai az AKT-nak és a Tanács Matematikai és Természettudományi Kuratóriumának. Az Akadémiai életben való részvételünket jellemzi, hogy a 2000-ben lezajló diszciplína-vita eredményeképpen egy igen színvonalas, több mint száz oldalas kiadványt készítettünk *Fizikai tudományok az ezredfordulón* címmel. Az Osztály külön díjakat alapított (Fizikai Díj és Fizikai Fődíj) kimagasló tudományos teljesítmények elismerésére. Ezeket a tavaszi akadémiai közgyűléshez kapcsolódó tudományos rendezvényeken veszik át a díjazottak. Szoros kapcsolatot tartunk az Eötvös Loránd Fizikai Társulattal, és részt veszünk a társulat lapjának, a *Fizikai Szemlé*-nek a szerkesztésében, evvel is hozzájárulva a fizika szélesebb rétegek körében

való népszerűsítéséhez. Hétköznapijainkhoz tartoznak a havonta tartott osztályülések, amelyeken igen szép számmal vesznek részt az osztálytagok és doktor képviselők. Élen járunk a doktor képviselők osztályéletbe való bevonásában. Ebből a szempontból ügyrendünk talán legliberálisabb az Akadémián. A vidéki kutatóhelyek jobb megismerése céljából, többször tartunk kihelyezett osztályülést.

E rövid áttekintés természetesen nem adhat teljes képet a Fizikai Tudományok Osztályáról, de a következő oldalakon olvasható cikkekkel együtt az olvasó ízelítőt kap a fizika szépségéről, sokszínűségéről és arról, hogy a természet megértéséhez a fizika szilárd és elengedhetetlen alapot nyújt, amelyre a többi tudományág is építhet. A Fizikai Tudományok Osztálya pedig arra törekszik, hogy az itt felhalmozott tudás minél szélesebb körben terjedjen, az ország javára szolgáljon, és hírnevét öregbítse.



# A GENOMIKÁTÓL A PROTEOMIKÁIG ÉS A MOLEKULÁRIS DINAMIKÁIG

Balog Erika

tudományos főmunkatárs, Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet  
és MTA Biofizikai Kutatócsoport, Budapest

Fidy Judit

egyetemi tanár, Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet  
és MTA Biofizikai Kutatócsoport, Budapest – judit@puskin.sote.hu

Az utóbbi évek egyik legnagyobb tudományos szenzációja kétségtelenül az ember genetikai kódjának megfejtése volt. Az első, a *genom* csaknem 100 %-ára vonatkozó leírást 2001-ben publikálták (Lander et al., 2001; Venter et al., 2001), és további két év kellett a mintegy tizenhárom évig tartó projekt befejezéséhez. Ez az emberi fehérjeállomány genetikai kódját jelentő kb. háromezilliárd DNS-bázispár sorrendjének ismeretét, és az általuk meghatározott fehérje-kódszakaszok (gének) azonosítását jelentette. Az eredményeket hatalmas lelkesedés fogadta, és a felfedezés jelentőségét ma sem tartjuk kisebbnek. A jelen kutatási időszakot szokás *postgenomic era*-ként, azaz a genom ismerete utáni időszaknak nevezni. Ez nem időbeliséget jelent elsősorban, hanem arra utal, hogy a génállomány ismerete után még sok a tennivaló, amíg valóban eljutunk az egyénekre specializált, molekuláris szintű terápiai beavatkozások sikeréhez.

A genetikai ismeretek gyakorlati, terápiai alkalmazásához tisztázni szükséges, hogy egy patológiás esetben milyen ponton térnek el az anyagcsere-folyamatok háttérben álló biokémiai reakciók a normálistól. Felelősként gyakran téves funkciójú, azaz téves szerkezetű fehérjéket találnak. De hol kell beavatkozni a probléma megoldásához? Ha

megbecsüljük, hogy egy élőlény teljes életideje alatt hányféle fehérje vesz részt az életfolyamatokban (ez a teljes fehérjeállomány, a „proteom”), akkor igen nagy számot kapunk (ez emberre kb. 400 ezer) a fehérjekódoló gének számához (emberre kb. 22 ezer) képest. Azaz a genom ismerete nem adja meg a proteom ismeretét, ahogy korábban gondolták. A jelenség ennél sokkal bonyolultabb; vagyis a fehérjék szintézise és anyagcsere-folyamatai során még eddig fel nem tárt, igen sokféle módosulás történik, aminek útja más lehet a szervezet különböző szöveteinél, az életkortól és külső – fizikai és kémiai – tényezőktől is függően.

Ezek az ismeretek a kutatók figyelmét a patológiai problémáért felelős molekulák – fehérjék – felismerésére és a *molekuláris szintű kölcsönhatások megismerésére* irányították. Ennek megfelelően kialakult egy intenzíven művelt új tudományág, a *proteomika*, amely egyfajta sejt/szövet/szervezet teljes fehérjeállományának felderítését célozza meg a következő lépéseken át:

1. A fehérjék szeparálása.
2. Az izolált fehérjék azonosítása főbb jellemzőik szerint.
3. Az egyes frakciók mennyiségi jellemzése.
4. Az aminosavsorrend (szekvencia) meghatározása.



5. Szerkezeti proteomika: az egyes fehérjék atomi részletességű térbeli szerkezetének meghatározása röntgenkristallográfiával és/vagy mag mágneses rezonancia (NMR) spektroszkópiával.
6. Kölcsönhatási proteomika.
7. A fehérjeszerkezet módosulási útjának leírása.

Kutatócsoportunk hosszú ideje folytat vizsgálatokat abban a kérdéskörben, hogy az életfolyamatokat meghatározó kölcsönhatásokban és a fehérjék enzimatikus aktivitásában milyen szerepet játszik a fehérjeszerkezet vázát képező sok aminosavból álló polipeptid lánc speciálisan feltekeredett térszerkezete, különös tekintettel a hőmérsékletből adódóan kialakuló belső mozgások, az ún. *konformációs dinamika* szerepére (proteomika: 4., 5., 6. lépések). Az, hogy a térszerkezet alapvetően fontos a fehérjék funkciói szempontjából, régóta ismert volt. A feltekeredést természetesen a genetikai kódból származó aminosavsorrend határozza meg. Az így egymás közelébe kerülő atomcsoportok között azonban több nagyságrendet átfogó kötése erősségű, többféle kötés lehetséges, és így ma még a szekvencia alapján nem mondható meg biztonsággal, hogy adott külső feltételek mellett (például ionos környezet, koncentráció stb.) a feltekeredés milyen „úton” megy majd végbe, és milyen térszerkezethez vezet. A térszerkezet fontossága mellett azonban már a 70-es évek végétől egyes kutatók felhívták a figyelmet arra, hogy a mérésekből a minta egyes molekulaszerkezeteinek *átlagát* kapjuk meg, és az atomok az átlagnak megfelelő helyzet környezetében a fehérjefunkció szempontjából igen fontos mozgásokat végeznek. Az első példa az izomzatban az oxigénszállítást végző mioglobinnal röntgenkristallográfiával nyert szerkezete volt (Kendrew et al., 1958), amellyel kapcsolatban felhívták a figyelmet arra, hogy ha a molekula minden időpillanatban a mérési adatokból származtatott szerkezetben

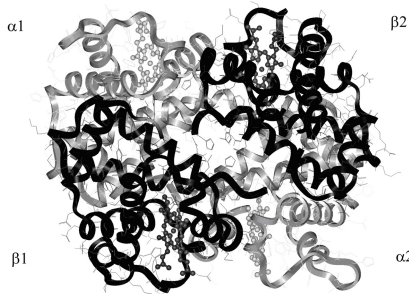
lenne, akkor az oxigénmolekula nem férne be a szerkezetbe a korábban már bizonyított kötőhelyre (Case – Karplus, 1979). A térszerkezet/konformáció dinamikai természetét a röntgendiffrakciós eredmények további elemzése, majd a területen megjelenő NMR spektroszkópia eredményei is alátámasztották, azonban ezek a módszerek a mérési eljárások természete miatt nem alkalmasak arra, hogy konkrét fehérjék konformációs dinamikáját a biológiai reakciókra jellemző, natív környezeti körülmények között részleteiben feltárják. A közelmúltban megjelent új modern mikroszkópiai módszerek már olyan eredményeket szolgáltatnak, amelyek egyetlen fehérjemolekula valamely szerkezeti paraméterének fluktuációját közvetlenül jelenítik meg (Weiss, 1999). Ezek a módszerek azonban szintén speciális körülményeket jelentenek, és egyelőre széleskörűen még nem érhetőek el. Ugyanakkor egyre több kísérleti eredmény születik, ami azt mutatja, hogy a konformációs dinamikának a molekuláris kölcsönhatásokban meghatározó szerepe van. A belső mozgások révén nyílnak meg kötőhelyek, szubsztrátokat a reakciócentrumokhoz szállító csatornák, sőt a reakciópartnerek mozgását is a konformációs dinamika teszi lehetővé. Lehetséges, hogy a dinamikai változás a fő oka egy-egy funkció sérülésének.

Miután a natív körülményekre jellemző dinamikai tulajdonságok leírásának igénye felmerült, de erre kísérleti lehetőség nem mutatkozott, egy szellemes ötlet jelent meg a tudományban a probléma elméleti/számítógépes megközelítésére (McCammon et al., 1977). Ez a számítógépes *molekuladinamikai szimuláció (MDS)* módszercsalád. Röviden, az ötlet az volt, hogy induljunk ki az atomi részletességű szerkezetmeghatározás adataiból, és próbáljuk meg e távolságokkal, szögekkel és paraméterekkel felírni egyszerű függvények formájában az egyes atomok közötti kovalens és nem kovalens kölcsönhatási

energiákat. A molekula állapotának számítógépes kezelése így lehetőséget ad arra, hogy a molekula natív környezetét (hidrátburok; környezeti ionok; oldószer mint közeg) is belefoglaljuk a modellünkbe (sőt, a kristályosítás érdekében végzett módosításokat is mód van korrigálni). A kapott sok tagból álló energiafüggvénynek első lépésként az atomi koordináták változtatásával megkereshetjük a minimumát. Ez már a kiindulási szerkezet közelítését jelenti a natív helyzethez, de még a mozgást nem tartalmazza. Az atomi mozgásokat a hőmérséklettel az ideális gáz analógiájára az átlagos kinetikus energián keresztül kapcsoljuk össze. Ez az analógia azt is megszabja, hogy milyen tartományban, milyen súllyal forduljanak elő atomi sebességek, és ezeket véletlenszerűen kiosztjuk az atomok között. Az energiafüggvény alapján ki tudjuk számítani az atomok között ható erőt, így egy alacsony hőmérséklet (például 100 K) és kezdősebesség-kiosztás után elindulhat az atomi helykoordináták változásának számítása az első időtartam (például 1fs) alatt. A megváltozott szerkezet az energiafüggvényen keresztül visszacsatolódik, és így a helyzet lépésenként módosul, amíg az energiafüggvény értéke stabilizálódik. Ekkor lehet a hőmérsékletet kis lépéssel megemelni, és az eljárást ismételni addig, amíg a natív állapotnak megfelelő helyzetet el nem érjük. Ebben az állapotban azután hosszú ideig lenne célszerű hagyni a rendszert, mert ekkor jellemző a dinamika a molekula tényleges viselkedésére. Több ns is szükséges lehet ahhoz, hogy számunkra érdekes kis valószínűségű lokális fluktuációk is bekövetkezzenek. A számítógépes futtatás időtartama a molekula méretétől és a számítógépes kapacitástól függően alakul ki (például egy közepes nagyságú fehérje 1 ns-os dinamikája egy hatprocesszoros számítógépen három napig tart). Ezt a komoly korlátot próbálják úgy is feloldani, hogy az energiafüggvényt nem atomi részletesség-

gel, hanem egyes atomcsoportokat, kisebb összetevőket, molekula-komponenseket egy egységként felfogva adják meg. Így az adott számítógép-kapacitás hosszabb idejű futtatásokat tesz lehetővé, a durva közelítések viszont problémákat jelentenek. Kutatócsoportunk azt az utat választotta, hogy inkább kevesebb rendszert vizsgálunk egyidejűleg, azonban atomi részletességű közelítésben. Fehérjék területén a legismertebb ilyen típusú molekuladinamikai programcsomag a CHARMM (Brooks et al., 1983), nukleinsavakkal dolgozók inkább az azonos elven működő AMBER (Weiner–Kollmann, 1981) csomagot használják.

Az MDS számítások eredménye egy hatalmas adathalmaz: minden atom egyedi koordinátái az idő függvényében. Ha ide érkezett egy munka, akkor az a probléma merül fel, hogy miként lehet ezen adathalmazból a legfontosabb információkat kinyerni, illetve továbblépni, a nagyobb egységek mozgását, azaz a funkció szempontjából különösen fontos korrelált mozgásokat felderíteni. A továbbiakban röviden összefoglalva két területről mutatunk be saját eredményeket,



*1. ábra* • A hemoglobin röntgenkristallográfiával meghatározott szerkezete. A „szalag” reprezentáció a polipeptid-lánc vonulatát mutatja az aminosavak szerkezete nélkül. Az oxigént kötő hem-csoportok szerkezetét alegységként feltüntettük. Sötétebb tónussal a  $\beta$ , világosabbal az  $\alpha$  alegységeket jelöltük.

ezzel szemléltetve a lehetőségeket és egyben a jelenlegi kutatási témáinkat.

#### *A hemoglobin kooperatív oxigénkötésének és alloszterikus viselkedésének vizsgálata*

A hemoglobinmolekula (Hb) két-két azonos és egymáshoz is hasonló alegységből épül fel, amelyek mindegyike közel centrális helyzetben „hem”-csoportot tartalmaz, ahol az oxigénmolekula megkötése történik. (1. ábra)

A kooperatív viselkedés azt jelenti, hogy ha már az egyik hem-csoport oxigént kötött meg, akkor a következő, szomszédos alegységben már könnyebben kötődik meg a következő oxigén. Az alloszterikus viselkedés azt jelenti, hogy bizonyos molekulákat (ún. heterotróp effektorokat) a tetramer szerkezet képes megkötni a centrális üregben, és ezáltal az oxigénmolekulák kötése erőssége az alegységek hem-csoportjainál módosul. Mindkét effektus azt mutatja, hogy az alegységek a határfelületeken keresztül a centrális helyzetű hem-csoportokig kommunikációs láncsal rendelkeznek. A kommunikáció titkának megértése a szerkezet oxigénellátottságának regulálását tenné lehetővé, így a területen hosszú ideje intenzív kutatómunka folyik. A nagyszámú publikáció szerkezetvizsgáló módszerekkel nyert adatai az oxigént kötő (R) és az oxigénmentes (T) állapotra, mutánsokra és az effektorokkal alkotott komplexekre vonatkozóan mutattak ugyan határozott szerkezeti változásokat, azonban nem adtak magyarázatot az alapkérdésre, és nem voltak összhangban az oxigénasszociációs mérések eredményeivel. Munkánk során elsőként végeztünk el MDS vizsgálatokat a teljes tetramer szerkezeten, natív környezeti feltételek mellett, mind az R, mind a T állapotban, valamint több effektorral alkotott komplex esetében (Lalberge et al., 2005). A dinamika átlagaként nyert szerkezetek már érdekes eltéréseket mutattak a röntgenkristallográfiával nyert adatokhoz képest: egyes konkrét kötések változása he-

lyett az alegységek határfelületének egészét érintő változásokat mutattak. Az effektorok globális hatása alapján sikerült az oxigénaffinitás-mérések eredményeivel (Yonetani et al., 2002) is összhangot találni. A dinamika részletes elemzése pedig azt mutatta, hogy az effektorok kötése az alegységek dinamikáját specifikus módon módosítja. Eredményeink azt jelzik, hogy a molekuladinamika az a tulajdonság, amely közvetíteni képes az oxigénkötő helyek és az effektorok kötés helyei között. A problémakört tovább vizsgáljuk a korrelált mozgások elemzésével.

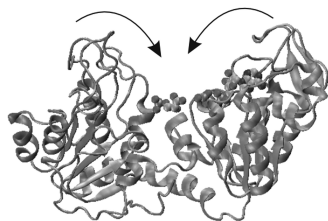
#### *A foszfoglicerát kináz domén-mozgásának vizsgálata*

A foszfoglicerát kináz (PGK) egy két doménből álló monomér enzim, amely a glikolízis egyik lépéseként az ADP foszforilációját katalizálja. A reakció két szubsztrátja az 1,3-foszfoglicerát és az ADP. A szerkezet problematikus pontja, hogy a kölcsönható molekulák túl távol vannak egymástól ahhoz, hogy a reakció végbemehessen. Kísérleti eredmények fiziológias körülmények között arra utaltak, hogy a szubsztrátok jelenlétében a két domén valószínűleg összezárul. Húsz évig tartó erőfeszítés után sikerült egy *speciess* esetében a reakciókomplexet kikristályosítani és szerkezetét meghatározni (Bernstein et al., 1997). Ez valóban zárt szerkezetnek felelt meg. Ma még mindig nem rendelkezünk szerkezeti leírásról ugyanazon species nyitott (szubsztrátkötő) és zárt (foszforiláló) szerkezetéről, és a szubsztrátok által indukált, a két szerkezetet összekötő konformációs mozgás részletes ismerete is hiányzik.

A közelmúltban négy nanomásodperc tartományban végzett molekuladinamikai szimulációval és kovariancia analízissel kimutattuk, hogy a két domén egymással korrelált és ellentétes fázisú mozgást végez, azaz egymáshoz közeledik, illetve távolodik (lásd nyílik a 2. ábrán). Ez a statikus szerkezetek alapján feltételezett mozgás valóban létezik

a molekulában, a szerkezet konformációs dinamikai tulajdonsága. Ez a merev testszerű mozgás valóban egymáshoz közel viszi a két szubsztrátot, lehetővé téve így a reakciót.

Az előzőekben alátámasztani kívántuk a fehérjék konformációs dinamikájának alapvetően fontos szerepét, és röviden bemutattunk néhány ismeretet, amelyet erről a kérdéskörrel számítógépes módszerekkel nyertünk. A megközelítésben ugyan csak *szimuláljuk* a konformációs mozgást, a kísérleti eredményekkel való egyezés azonban igazolja, hogy jó úton járunk. És bár csak a nanomásodperces skálájú mozgásokat tudjuk jellemezni, azonban azt tapasztaljuk, hogy ezen adathalmazra építve a korrelált mozgások és kollektív rezgések meghatározásával a hosszabb időskálájú, valóban funkcionális jelentőségű mozgások jellegére elég nagy biztonsággal következtethetünk. A számítógépes molekuladi-



2. ábra • A foszfoglicerát kináz röntgendifrakciós szerkezete ligandumkötő helyekkel. Nyílakkal a doménmozgásokat szemléltettük.

namikai szimuláció tehát mindinkább az élettudományok más technikákkal egyelőre nem kiváltható, alapvetően fontos fizikai módszerévé válik.

**Kulcsszavak:** szerkezeti proteomika, DNS, fehérjék, konformációs dinamika, molekula dinamika

#### IRODALOM

- Bemstein, E. Bradley – Michels, P. M. A. – Hol, W. G. J. (1997): Synergistic Effects of Substrate-Induced Conformational Changes in Phosphoglycerate Kinase Activation. *Nature*. 385, 275-278.
- Brooks, Bernard R. et al. (1983). CHARMM: A Program for Macromolecular Energy, Minimization and Dynamics Calculations. *Journal of Computational Chemistry*. 4, 187–217.
- Case, David A. – Karplus, Martin (1979). Dynamics of Ligand Binding to Heme Proteins. *Journal of Molecular Biology*. 132, 343–368.
- Kendrew, John C. et al. (1958). A Three-Dimensional Model of the Myoglobin Molecule Obtained by X-Ray Analysis. *Nature*. 181, 662–666.
- Labege, Monique et al. (2005), R-State Hemoglobin Bound to Heterotropic Effectors: Models of the DPG, IHP and RSR13 Binding Sites. *FEBS Letters*. 579, 627–632.
- Lander, Eric S. et al. (2001): Initial Sequencing and Analysis of the Human Genome. *Nature*. 409, 860-921.
- McCammon, J. Andrew – Gelin, J. A. – Karplus, M. (1977), Dynamics of Folded Proteins. *Nature*. 267, 585–590.
- Venter, J. Craig et al. (2001), The Sequence of the Human Genome. *Science*. 291, 1304–1351.
- Weiner, Paul W. – Kollmann, Peter A. (1981), AMBER: Assisted Model Building with Energy Refinement. A General Program for Modelling Molecules and Their Interactions. *Journal of Computational Chemistry*. 2, 287–303.
- Weiss, Shimon (1999), Fluorescence Spectroscopy of Single Biomolecules. *Science*. 283, 1676–1683.
- Yonetani, Takashi et al. (2002): Global Allostery Model of Hemoglobin. Modulation of O<sub>2</sub> Affinity, Cooperativity, and Bohr Effect by Heterotropic Allosteric Effectors. *Journal of Biological Chemistry*. 277, 34508–34520.

# AZ ATOM-FOTON MOLEKULA

Domokos Péter

PhD, tudományos főmunkatárs, MTA SZFKI

domokos@optics.szfi.kfki.hu

Az ismert kölcsönhatások közül az elektromágneses kölcsönhatás megértésében, laboratóriumi használatában jutott legmesszebbre a tudomány, ami a fizika kísérleti és elméleti eszköztárába visszaépülve új lehetőségeket nyújt a természeti törvények megismerésére. Az elmúlt évtizedben lenyűgöző fejlődésen átment két terület, a rezonátorok és a hideg atomok összekapcsolódása egyedülálló mikroszkopikus rendszert teremtett, amely lehetővé tette, hogy a fény-anyag csatoláson keresztül kölcsönható rendszerekben előforduló, általános érvényű, alapvető fizikai jelenségeket tárhassunk fel.

A bitokunkba került új „eszköz” egy mikroszkopikus méretű optikai rezonátor és benne egy hosszú ideig csapdázott atom, ami erősen csatolódik a rezonátorban lévő sugárzási térhez. A kölcsönhatást nagy pontossággal szabályozhatjuk, és a rendszer viselkedésére egy kvantummechanikai szinten meghatározott dinamikát róhatunk ki. A lehetséges alkalmazások ismertetése nélkül is érzékeltethető ennek a rendszernek az újszerűsége. Korábban, az elektrodinamikával kapcsolatos jelenségekben a fény-anyag kölcsönhatás valamelyik komponensére durva egyszerűsítéseket tehattünk, az csupán paraméterként szerepelt a másik komponens dinamikájában. Gondoljunk egyrészt az optikára, ami a kanonikus példa arra, hogy anyagi közeget használunk a sugárzás manipulálására: fénysugár terjedését szabályozzuk lineáris fázismoduláló eszközökkel (lencse, prizma stb.), vagy kristályokban többfotonos atomi

átmeneteken keresztül nemlineáris folyamatokat indukálhatunk, felharmonikusokat kelthetünk stb. (hullámok keverésére közismert – nem optikai – példa az amplitúdó (AM), illetve frekvenciamodulált (FM) jelátvitel módszere rádióadóknál). Az anyagi közeget törésmutatóval jellemezzük, ami lehet komplex, frekvencia- vagy intenzitásfüggő, illetve akár tenzor is (rendre elnyelő, diszperzív, nemlineáris, illetve kettőstörő közegekre), mindenestre egy paraméter, amit a sugárzás terjedését leíró Maxwell-egyenletekbe lehet beírni. Másrészt, a „komplementer” esetben sugárzást használunk anyagi részecskék kezelésére. Például a lézerspektroszkópiában (vagy infravörös, röntgen stb.) elektronátmeneteket gerjesztünk atomi energianívók között. A gerjesztés akkor hőközléssel járhat együtt, ami akár egy anyagdarab felületének precíz, lézeres megmunkálására elegendő. Érdekes módon lézerekkel hőt elvonni is lehet az anyagból, lézeres hűtés módszereivel atomok termikus (zaj) mozgását rendkívül alacsony hőmérséklettartományokig ( $\mu K$  alá) csillapíthatjuk le. Ezen jelenségek tárgyalásánál a lézersugárzás térerősségét egy rögzített amplitúdófüggvénnyel adjuk meg, amit az anyag viselkedését leíró Newton- vagy Schrödinger-egyenletben kell figyelembe venni.

Rezonátorban a fény-anyag kölcsönhatásnak egy olyan általánosabb szintje valósul meg, ahol a sugárzási és az anyagi összetevő is dinamikus változó. Egymás időfejlődését kölcsönösen befolyásolják, és a kialakuló csatolt dinamika a felsorolt jelenségek bo-

nyolult kombinációjára vezet. Ezt vizsgálja a rezonátoros kvantumelektrodinamika („cavity QED”).

A terület nem új keletű, eredetileg abból a felismerésből született (az 1940-es évek második felében), hogy egy atom sugárzását nemcsak az ő belső tulajdonságai (elektromos szerkezete) határozzák meg, hanem a környezetében lévő elektromágneses tér vákuumbeli energiasűrűsége is. Ez utóbbi pedig határfeltételekkel módosítható, ami lehetőséget ad atomok sugárzásába való beavatkozásra. Az 1980-as években kísérletekben is kimutatták, hogy rezonátoron átlőtt gerjesztett állapotú atomok a természetes élettartamuknál hosszabb ideig gerjesztettek maradtak, vagy ellenkezőleg, a rezonátor hangolásától függően spontán bomlásukat fel lehetett gyorsítani.

Ezekben a kísérletekben a  $\gamma$  spontán emissziós rátának néhány százalékos változását lehetett megfigyelni. A rendszer alaptulajdonságait meghatározó további paraméterek a gatom-tér csatolási állandó, a  $\kappa$  rezonátor csillapodási ráta és  $\tau$  a kölcsönhatási idő. Erős csatolás esetében,  $g \geq \kappa, \gamma, \tau^{-1}$  egy gerjesztett atom megszokott spontán bomlása be sem következik, azt elnyomja az atom-rezonátor kölcsönhatásból származó koherens dinamika. A rendszer legalacsonyabb gerjesztett állapotában az egységnyi energiakvantum vagy egy foton formájában van jelen, vagy az atom állapotának gerjesztettségében. A két lehetőség között időben harmonikus oszcilláció valósul meg  $g$  frekvenciával (Rabi-frekvencia). A gerjesztett atom tehát átadja az energiáját a tének, de azt visszanyeli  $1/g$  idő elteltével. Nagy frekvencia esetén az atom és a rezonátor sokszorosan kicseréli egymás között az energiakvantumot, mielőtt az a környezetbe kiszökik ( $1/\kappa$  vagy  $1/\gamma$  várható idő után). Az atom és a tér elvesztik identitásukat: egy *atom-foton molekula* alakul ki. A rendszer sok szempontból analógiát mutat egy kétatomos molekulával, csak az

egyik atomot az elektromágneses tér egy módusára cseréljük ki.

Erős csatolást először a mikrohullámú tartományban értek el a 90-es években. A tükrököt szupravezető niobiumból készítették, a kb. 6 mm hullámhosszú sugárzási térrel pedig ún. Rydberg-atomok (nagyon magasan gerjesztett egy vegyérték-elektronos atomok, tipikusan a főkvantumszám nagyobb mint 50) állapotai közötti átmenetek hatnak kölcsön. Egy sor alapvető fontosságú eredmény született az atom-foton molekulán végzett kísérletekből: például itt igazolták először közvetlen módon a fotonok létezését. (Brunne et al., 1996) Az energiacsere frekvenciája az atom-foton molekula első gerjesztett állapotában  $g$  (egy fotonnál), a másodikban már  $2^2g$  (két foton), a harmadikban  $3^3g$  (három foton) stb. Ezen diszkrét frekvenciák mind megjelentek a spektrumban, ami bizonyítja a sugárzási tér kvantáltóságát. Továbbá a dekoherencia időfelbontott megfigyeléseivel kvantitatívan kimérték a kvantummechanika által megengedett szuperpozíciós állapotokra jellemző interferencia eltűnését, amint egyre nagyobb gerjesztettségű kvantumállapotok szuperpozícióját próbáljuk létrehozni. Ez alátámasztotta a dekoherenciaelméletek magyarázatát arra vonatkozóan, hogy miért nem látunk kvantuminterferenciát a makroszkopikus világban.

Az optikai tartományba való átlépés minőségi különbséget jelent. Egy foton lendülete ugyanis  $h\vec{k}$ , ahol  $h$  a Planck-állandó,  $k$  a hullámhosszal fordítottan arányos a hullámhosszal. Adott tömegű atomra kifejtett mechanikai hatás egy „optikai” foton ( $\mu\text{m}$  alatti hullámhossz) esetén négy nagyságrenddel nagyobb, mint a mikrohullámú tartományban. Az iménti, szemléletes energiacsere képben, amikor a tér periodikusan visszaadja a fotonnyi energiakvantumot az atomnak, egyben  $h\vec{k}$  lendületet is közöl vele, ami például a nehéz rubídiumatom tömegével számolva is cm/s sebességnek felel meg.

A kölcsönhatás ideje alatt ez számottevő elmozdulást okoz, ami már az atom tömegközépponti mozgásának szabadsági fokát is bekapcsolja a dinamikába.

Technikai szempontból a nagy áttörést a dielektrikum multirétegekből készített rendkívül nagy reflektivitású tükrök megjelenése hozta. Ezekkel a tükrökkel kialakított kicsiny módustérfogatú, nagy jósági tényezőjű rezonátorokban az optikai hullámhossztartományban is megvalósult az erős csatolás tartománya. A csatolás erősségének növeléséhez csökkenteni kell a rezonátor módustérfogatát, tehát közelíteni kell a tükröket egymáshoz (mai csúcskísérletekben tipikusan  $10\text{--}100\ \mu\text{m}$  a tükrőtávolság). Ilyenkor a fotonok gyakrabban szenvednek reflexiót, ezért a  $\kappa$  foton kiszökési rátaszinten tartása rendkívül magas  $R$  reflexiós tényezőt követel meg. Az erős csatoláshoz jellemzően  $R > 0,99999$  szükséges, azaz egy áteresztésre statisztikusan  $10^5\text{--}10^6$  visszaverődés jut. Bizonyos szempontból úgy tekinthetjük, hogy egyetlen foton sokszorosan „körbefut” a rezonátorban, minden alkalommal ütközik az atommal, és összességében akkora hatást fejt ki rá, mintha egy lézerből egymillió fotont küldenénk az atomra. Az ismétlődő szórás másik oldala, hogy egyetlen foton – kissé lazán fogalmazva – nagyon sok információt gyűjt az atomról. Például közismert, hogy az optikai feloldóképesség nagyjából a hullámhosszal egyenlő. Egy rezonátorban ugyanakkor, ha detektáljuk a tükrön végül átjutó fotonokat, a hullámhossznál a körbefutások számának gyökével arányosan jobb felbontóképességet kapunk (a fenti példában a hullámhossz ezredrészének, tehát angströmnek megfelelő pozíciókülönbségeket lehet megkülönböztetni). Mozgó atom esetében az atom trajektóriáját a rezonátorból kijövő intenzitás időfelbontott méréséből, rövid integrálási idővel ( $\mu\text{s}$ ) is nagy térbeli pontossággal ( $\mu\text{m}$ ) rekonstruálni lehet (Hood et al., 2001).

Mikrohullámú tartományban a fotonok elhanyagolható lendülete miatt az atomok determinisztikus pályán haladnak keresztül a rezonátoron, és a geometria által megszabott ideig hatnak kölcsön a térrel. Optikai rezonátorban viszont már egy nagyon gyenge tér is az ismétlődő szórás miatt számottevően megmozgatja az atomot. A kölcsönhatás ideje tehát a dinamikától is függ. Kérdéses, hogyan lehet a kicsiny módustérfogatban ( $\sim\mu\text{m}^3$ ) tartani az atomot, hogy érvényesüljenek az erős csatolás jellemzői (lásd  $T > g^{-1}$  feltétel), azaz kialakuljon az atom-foton molekula. Érdekes módon, még üres rezonátorban is a vákuumtér kvantumfluktuációi zajt okoznak az atom sebességterében. Az első mérési tapasztalatok szerint a rezonátor tere jelentékenyebb diffúziót okozott az atomok mozgásában, mint ami a szabad lézertérben mozgó atomoknál következik be. Részben ez a „zavaró” jelenség vezetett el atomok rezonátorterében történő mozgásának alaposabb tanulmányozásához, mind elméleti, mind kísérleti fronton. A probléma érdekességét jól jellemzi, hogy míg 2000-ben mindössze két laboratóriumban, a kaliforniai Caltech-en és a müncheni Max-Planck Intézetben volt erős csatolású rendszer, ma már több mint húsz helyen folynak a kísérletek.

Atomok lézertérben bekövetkező Brown-mozgásának leírására kidolgozott elméletet általánosították rezonátortérre. Bonyolult számolás eredményeképpen 1997-ben kiderült (Horak et al., 2000), hogy bizonyos paramétertartományokban hűtés következik be. A hűtés folyamatát leegyszerűsítve úgy lehet elképzelni, hogy amikor az atom a potenciálvölgyből felfelé halad, a rezonátor tere ezt megérzi (ehhez kell a paraméterek megfelelő beállítása), és megmagasítja a potenciálfalat. Amikor fordítva, a völgyben lefelé halad az atom, akkor pedig csökkenti a völgy mélységét. Egy adott magasságba felkapaszkodó atom nagyobb mozgási energiát veszít, mint amit a völgybe legurulva vissza-

kap, összességében csökken a mozgási energiája, lehűl. A rendszert jellemző frekvenciák közötti elhangolásokat ellenkező előjellel beállítva éppen az ellenkező folyamat, fűtés következik be. Ezt a fajta dinamikát nagyon letisztult formában 2004-ben mérték ki (Mananz et al., 1997).

A dinamika pontos megértésének és kontrolljának következtében elképzelhetővé vált, hogy maga a rezonátorbeli tér csapdázza az atomot a saját duzzadóhelyén kialakuló potenciálmínimumban. A csapdabeli konzervatív rezgőmozgásra rárakódó hűtési mechanizmusnak köszönhetően a csapdázási idő rendkívül hosszú lehet, és a rezgések amplitúdója a hullámhossz töredékére csökken. A legújabb kísérletekben egy atomot a hullámhossz tizedének megfelelő tartományban sikerült lokalizálni akár másodpercekig is, ami az atom-foton molekula spektrumának nagyon pontos kimérését tette lehetővé.

Az elkövetkező években az atom-foton molekula többféle alkalmazásban jelenik majd meg. Az egyik érdekes felhasználási mód a „fotonpisztoly”. A jól pozicionált atomon keresztül, ún. robusztus kvantumkontroll technika segítségével egy klasszikus, sokfotonos lézerpulzus determinisztikus módon átalakítható egyfotonos impulzussá. Az egyfotonos impulzus tulajdonságai erősen nem-klasszikusak, ez a kvantumtérelmélet egy kitüntetett állapota, az ún. Fock-állapot. Ilyen állapotokra van szükség a kvantuminformáció processzálásában is. A most ismert egyfotonforrások valószínűségi elven működnek, ezzel szemben a fotonpisztoly „kérésre” szolgáltat egy és pontosan egy fotont, ami lényegesen egyszerűsíti a protokollokat (mondhat persze „csütörtököt”, de ez nem elvi, hanem technikai kérdés). Az atom-foton molekula tekinthető egy átalakítónak, amelyben a kvantumzaj által limitált szinten lehet fényenergiát atomi gerjesztettségbe konvertálni, és viszont. Egy foton pola-

rizációs állapotában hordozott kvantumbit információt egy atom elektronfelhőjének állapotába be lehet írni, és onnan veszteség nélkül ki lehet olvasni. Később összetett hálózatot építhetünk rezonátorban tárolt atomokból mint csomópontokból, amelyek egymás között a fénysebességgel haladó fotonokon keresztül kommunikálnak.

Térjünk vissza az atom mozgásához dinamikus csatolt rezonátor terének felhasználásával történő optikai hűtés egy másik következményéhez. Ez a módszer felszámolja a standard lézeres hűtési eljárások alkalmazhatóságának közös korlátját. Bármilyen hűtési eljárásban szükség van egy disszipációs csatornára, amelyen keresztül irreverzibilis módon vonjuk ki a rendszer kinetikus energiáját. A lézeres hűtésben más nem jöhet szóba, mint a spontán emisszió, az energiát az elektromágneses sugárzási tér vákuumállapotban lévő módusaiba pumpáljuk át. Egyetlen spontán kibocsátott foton kis energiát tud csak elvinni, ezért ismételt szórásra van szükség. Ugyanakkor egy gerjesztett állapotú atom spontán bomlással többféle végállapotba juthat. A fotonszórás ciklusának sokszoros ismétléséhez biztosítani kell, hogy egy zárt altérben maradjon az atom állapota, amelyet csak az atomok szűk osztályán lehet egyedi módon megtenni. Ez megakadályozza a hagyományos optikai módszerekkel történő hűtés kiterjesztését molekulákra, ugyanis a rezgési és forgási állapotok sokasága szinte egy sávot alkot, amelyben a populáció egy-két fotonszórás után szétterül.

Az erősen csatolt atom-foton dinamikában azonban van egy másik veszteségi folyamat: az irreverzibilis fotonkiszökés a tükrökön keresztül. Az atom mozgási energiája és az entrópia ezen a disszipációs csatormán keresztül is távozhat a rendszerből a környezetbe. Egy általános hűtési módszer koncepciója jelenik itt meg: a hűtendő objektumhoz csatoljunk egy kvantumrendszert, és



ezen keresztül egy új veszteségi csatornát. A legutóbbi elméleti munkák szerint a rezonátoron keresztül valóban tetszőleges lineárisan polarizálható részecske, molekula mozgását csillapítani lehet. Bár már az egyetlen mozgó atomból és egyetlen rezonátormódusból álló rendszer is bonyolult nemlineáris dinamikát produkál, tovább lehet építkezni több atomból, több módusból álló, összetettebb atom-foton molekulák létrehozásának irányában. A molekulakötésnek egy érdekes formája, hogy az atomokhoz közösen csatolt rezonátormóduson keresztül távoli atomok is „kommunikálnak egymással”. Ez érdekes soktestjelenségek felbukkanására vezet, például nemrégiben fázisátalakulást figyeltek meg az atomok homogén eloszlása és egy térben strukturált, önszervezett fázis között (Black et al., 2003). Az összetett atom-foton molekulák vizsgálata egyik izgalmas fejlődési iránya a további kutatásoknak.

Ultrahideg atomok és molekulák előállításának köszönhetően az anyag kvantumumos természetének különböző megnyilvánulásai jelentek meg, ami már számos alkalmazásra vezetett, mint például az atomóra, atom-interfe-

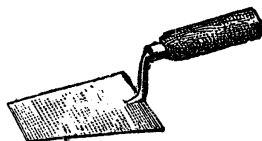
ronéterek (giroszkóp) és a litográfia. A temikus zajtól megszabadított, alapállapotában preparált kvantumobjektum a kvantuminformáció kezelésének kiindulópontja, ami olyan, már létező alkalmazásokat foglal magába, mint például kvantumállapotok teleportációja, több-bites kvantumlogikai műveletek és összetett algoritmusok keresési problémákban. Atomokból molekulát szintetizáló „szuperkémiának” úgyszintén előfeltétele, hogy a kiinduló állapot lényegében zérushőmérsékletű, jól meghatározott legyen. Az atom-foton molekula kutatása egyrészt kiterjesztette az alacsony hőmérsékletek elérésében alkalmazott lézeres hűtés módszereinek hatókörét. Másrészt az atom-foton molekula megvalósítja a „kvantumgépek” építőkövét, egy kvantummechanikai szinten kontrollált atomi rendszert, amelyen egy jövőbeli, az eszközök folyamatos miniaturizációjával elkerülhetetlenül kialakuló „kvantumtechnológia” alapszik.

Kulcsszavak: *kvantummechanika, hideg atomok, lézeres hűtés és csapdázás, optikai rezonátor, mikroszkóp*

#### IRODALOM

- Black, Adam et al. (2003): Observation of Collective Friction Forces Due to Spatial Self-Organization of Atoms: From Rayleigh to Bragg Scattering. *Physical Review Letters*. **91**, 203001
- Brune, Michel et al. (1996): Quantum Rabi Oscillation: A Direct Test Of Field Quantization in a Cavity. *Physical Review Letters*. **76**, 1800–1803.

- Hood, Christina J. et al. (2000): The Atom-Cavity Microscope: Single-Atoms Bound in Orbit by Single Photons. *Science*. **287**, 1447–1453.
- Horak, Peter et al. (1997): Cavity-Induced Atom Cooling in the Strong Coupling Regime. *Physical Review Letters*. **79**, 4974–4977.
- Maunz, Peter et al. (2004): Cavity Cooling of a Single Atom. **428**, 50–52



# AZ ERŐS KÖLCSÖNHATÁS FÁZISDIAGRAMJA

Fodor Zoltán

egyetemi tanár, ELTE TTK – fodor@bodni.elte.hu

Az elemi részek fizikája a világ legkisebb és legalapvetőbb építőelemeivel foglalkozik. A leggyakoribb vizsgálati eljárás e részecskék ütköztetése valamely részecskegyorsítóban. Sokkal több nagyenergiás elemi részecskével találkozhatunk bizonyos szélsőséges esetekben. Ilyen például a korai Világegyetem, a neutroncsillagok belseje vagy a nehézionok ütközése. Ezen fizikai folyamatok, történések segítségével letapogathatjuk a részecskefizikai elmélet, az erős kölcsönhatás fázisdiagramjának egyes részeit.

A jelenségkört leíró fizikai elmélet a kvantum-szándinamika, az erős kölcsönhatás elmélete. Töltéseinek szétválasztásakor az elektromosságban szokásos  $1/r$  típusú lecsengő potenciál helyett egy minden határon túlnövő lineáris potenciál jelenik meg. Ez a tulajdonság felel azért, hogy a protonokban található három kvark bezáródott. Az energia növelésével a kölcsönhatás gyengül. Ez fázisátmenethez vezethet, melynek során a bezárt kvarkok kiszabadulnak. Ilyen nagy energiák jelennek meg magas hőmérsékleten (ilyenkor az egy szabadsági fokra jutó energia nagy) vagy nagy sűrűségek esetén (ilyenkor a fermionok a Pauli-féle kizárási elv miatt kerülnek egyre magasabb és magasabb energiaszintekre). A részecskefizika kölcsönhatásait (a már említett erős kölcsönhatás mellett ilyen a radioaktív bétabomlásért felelős gyenge kölcsönhatás és a fotonokat leíró kvantumelektrodinamika) a kvantum-mezőelméletek adják meg. Ezen elméletek egy-

részt mezőelméletek (más szóhasználatlaltal térrelméletek), azaz a dinamikai változókat, mezőket (más szóhasználatlaltal tereket) a geometriai tér pontjaihoz rendeljük. A kvantum-mezőelméletek másik jellemzője, hogy kvantált elméletek. Így ezen elméletek is meghatározott energiaszintekkel rendelkeznek, kvantáltak. Ezen kvantumokhoz azonban már nemcsak meghatározott energiát, hanem impulzust, impulzusmomentumot, részecskeszámot is rendelhetünk. Kézenfekvő tehát a gondolat, hogy az elemi részecskéknek a fizikáját ezen részecskék, ezen kvantumok segítségével írjuk le.

Rendkívül meglepő az a tény, hogy fenti elképzelést kiegészítve két, szinte triviális feltétellel az elemi részek világának szinte minden jelensége nagy pontossággal leírható. Ezen két feltétel egyike az önellentmondásmentesség (ezt minden végső elmélettől természetesen elvárjuk). A másik feltétel, hogy az elmélet alapegyenleteit bizonyos szimmetriatranszformációk változatlanul hagyják. A kvantum-elektrodinamikában ez a transzformáció az anyagtereknek egy egységnyi abszolút értékű komplex számmal való megszorítása. A gyenge kölcsönhatás esetében a szorzás  $2 \times 2$ -es (speciális unitér) mátrixokkal, az erős kölcsönhatás esetében pedig  $3 \times 3$ -as (ugyancsak speciális unitér) mátrixokkal történik. Szinte hihetetlen, hogy ezen egyszerű transzformációk a kölcsönhatásokat egyértelműen meghatározzák, és az eredmény teljes összhangban van a kísérletekkel.

A problémák leggyakoribb megoldási módszere a perturbációs számítás. A perturbatív kezelés nem valósítható meg minden esetben. Különösen igaz ez az erős kölcsönhatásra, ahol a csatolási együttható nagy. Az ilyen kérdések megoldása csak egy másik módszer, az ún. rácstérelmélet segítségével lehetséges. A rácstérelmélet a teret és időt nem folytonos változókként kezeli, hanem egy ráccsal helyettesíti. A rács rácspontjaiba az elmélet mezőerősségeit írjuk. Láttuk, hogy kvantumelméleteket egymással fel nem cserélhető operátorok segítségével adhatjuk meg. Létezik egy másik, pályaintegrálos leírási mód, amely jobban illeszkedik a rácsformalizmushoz. A kvantummechanikai átmeneti amplitúdót úgy határozzuk meg, hogy minden létező klasszikus pályára összeadjuk az  $\exp(iS)$  fázisfaktorokat (a képzetes egységgyök,  $S$  az adott klasszikus pályához tartozó hatás). Fenti eljárást igen egyszerű mezőelméletek kvantálására használni. Ebben az esetben minden létező mezőkonfigurációra adjuk össze az  $\exp(iS)$  fázisfaktorokat. Mivel ezen fázisfaktorok igen erősen oszcillálnak, célszerű a számolásokat euklideszi térídoban elvégezni. Itt az idő formálisan a képzetes irányba halad, a fázisfaktorokból pedig  $\exp(-S)$  alakú, a statisztikus fizikából jól ismert, Boltzmann-faktorok lesznek. Ezen Boltzmann-faktorok összegét euklideszi állapotösszegnek hívjuk.

A kvantum-szindinamikához nagyon hasonló az elektrodinamika. Elektrodinamikában az elektromos és mágneses mezőket, tereket az  $A$  vektorpotenciál (valós szám), segítségével adjuk meg. Kézenfekvőnek tűnik az elektrodinamika nem-ábeli általánosítása. Ezen általánosítás során az  $A$  tér ne egy valós szám legyen, hanem  $2 \times 2$  (gyenge kölcsönhatás)  $3 \times 3$  (erős kölcsönhatás) nulla átlósösszegű hermitikus mátrix.

Hasonlóképpen az ábeli esethez (elektrodinamikához) a mértékinvariancia a nem-ábeli esetben is lényegében egyértelműen kijelöli az alakot. Érdemes megjegyezni, hogy az elektrodinamikával ellentétben a közvetítő

mező ( $A$ ) önkölcsönhatással rendelkezik, mely a térerősség tenzorban fellépő vektorpotenciál kommutátorokból ered. Az ábeli esetben a mértékterek valós számok, az ilyen kommutátor típusú tagok zérus értéket vesznek fel. Nem-ábeli esetben az  $A$  tereket mátrixokkal írjuk le, így a kommutátorok nem-zérus értéket vesznek fel.

Rácstérelméleti számolásokhoz az  $A$  tereket a rács élein, fermionikus tereket a rács rácspontjain értelmezzük. Az állapotösszegben az összes lehetséges  $A$  mezőkonfigurációra kell összeadnunk a bozonikus Boltzmann-faktor és a fermionikus determináns szorzatából álló tagokat. A rácstérelmélet mint módszer számos eredménye ellenére rendelkezett egy megoldhatatlannak tűnő problémával. Képes volt vákuumban, zérus anyagsűrűség mellett válaszokat adni a kérdéseinkre, de sajnos egészen a közelmúltig semmilyen eredményt nem kaptunk nem-eltűnő anyagsűrűség mellett. Ennek oka az elméleti fizika számos területén fellépő úgynevezett előjel probléma. Zérus anyagsűrűség esetén a fizikai mennyiségek kiszámításához szükséges állapotösszeg egyes tagjai mind pozitívak. Nem-eltűnő anyagsűrűség mellett az állapotösszegben mind pozitív, mind negatív tagok megjelennek, melyek nagyrészt kölcsönösen kiejtik egymást. Ennél is súlyosabb a negatív előjellel összefüggő következő probléma. A rácstérelméletben fontossági mintavételt alkalmazunk. Ennek során az egyes mezőkonfigurációk olyan valószínűséggel jelennek meg, mint amilyen az állapotösszegben a járulékuk. Ha azonban a járulék negatív, akkor nem létezik hozzá tartozó valószínűség. Ez a probléma minden fontossági mintavételen alapuló eljárást lehetetlenné tesz.

Az elmúlt években ezen a területen robbanásszerű változásnak lehetünk szemtanúi. Először az úgynevezett többparaméteres átsúlyozás eljárásával sikerült ezekre a fizikailag nagyon fontos kérdésekre választ adni nem-eltűnő anyagsűrűség mellett, majd számos új

módszer is megjelent az irodalomban. A nem-eltűnő anyagsűrűséget fizikailag a jól ismert kémiai potenciál segítségével vezetjük be. Minél nagyobb a kémiai potenciál, annál nagyobb az anyagsűrűség. A szokásos leírási mód a nagy kanonikus állapotösszeg. A Lagrange-függvény kiegészül a kémiai potenciál és az anyagsűrűség szorzatát tartalmazó taggal, majd elvégezzük a mértékterre és a fermionikus terekre a szokásos összegzést. Jelen esetben a kémiai potenciál a fermion-determinánsban jelenik meg, mely ennek következtében tetszőleges komplex szám lehet (ilyen módon jelenik meg az előjelprobléma).

A többparaméteres átsúlyozás módszere egy azonos átalakítás segítségével számolja ki az állapotösszeget. Először bevezetünk egy  $T_0$  segédhőmérsékletet. A fontossági mintavételezés  $T_0$  hőmérsékleten és zérus kémiai potenciál mellett történik (a zérus kémiai potenciál nem vezet előjelproblémára). Ez az átalakított állapotösszeg integrálási mértéke. Az azonos átalakítás miatt fellépő korrekciós tagot súlyként értelmezzük. Mivel ez a rész tartalmazza a determinánst, a súly nem mindig pozitív. A fontossági mintavételezés problémája megoldódott, az elméletnek a váltakozó előjelekkel kapcsolatos tulajdonsága pedig áthelyeződött egy oszcilláló súlyokból álló összeg kiszámítására. Az eljárás működésképpessége azon múlik, hogy a fenti módon bevezetett fontossági mintavételezés ( $T_0$ , zérus kémiai potenciál) során valóban a vizsgálni kívánt elmélet ( $T$ , nem-zérus kémiai potenciál) fontos konfigurációi jelennek-e meg.

Fentimódszerrel lehetőség nyílt nem-eltűnő kémiai potenciál esetén is az erős kölcsönhatás vizsgálatára. Az általunk vizsgálni kívánt fázisátmenet, matematikai értelemben egy szingularitás, valójában véges térfogaton soha nem jelenik meg, csak a végtelen térfogati határesetben. Célunk, az átmenet típusainak feltérképezése, a fázisdiagram megadása a hőmérséklet-kémiai potenciálsíkon, csak a térfogattfüggés feltérképezése révén valósítható

meg. A fázisátmenetnek megfelelő szingularitást végtelen térfogati határértékben az állapotösszeg zérushelye jelzi (érdeemes emlékeztetni arra, hogy például a nyomást  $\log(Z)$  segítségével adjuk meg). Véges térfogaton is megjelennek ilyen zérushelyek – Lee-Yang-zérók –, igaz, ezek nem-fizikai, komplex hőmérsékletekhez tartoznak. Amennyiben végtelen térfogati határértékben a rendszer egy valódi fázisátmeneten megy keresztül, akkor a Lee-Yang-zérók a térfogat növelésekor ráhúzódnak a valóstengelyre. Amennyiben csak egy gyors, de analitikus átmenettel állunk szemben, akkor a Lee-Yang-zérók a végtelen térfogati határértékben is nem-eltűnő képzetes résszel fognak rendelkezni, az átmenet analitikus marad. A Lee-Yang-zérók képzetes részének vizsgálata így lehetővé teszi a szingularitásra vezető fázisátmenet és az analitikus átmenet megkülönböztetését.

Összefoglalva: Két fázist különböztetünk meg. Az alacsony hőmérsékletű fázist hadronikus fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a hadronok, kvarkokból és antikvarkokból álló kötött részecskék). A magas hőmérsékletű fázist kvark-gluon plazma fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a kvarkok és gluonok). Zérus és kis kémiai potenciál esetén a két fázis közötti átmenet gyors. Egy adott hőmérséklet (kb. 162 MeV) és kémiai potenciál (kb. 360 MeV) esetén a fázisátmenet másodrendű. A fázisdiagram e pontját hívjuk kritikus végpontnak. Ebben a pontban a kritikus opaleszcenciához hasonló jelenségek kísérleti megjelenését várjuk. Ennél is nagyobb kémiai potenciál, illetve kisebb hőmérséklet esetén a fázisátmenet elsőrendűvé válik. A fázisdiagram kritikus pontjának tanulmányozása a németországi GSI (Darmstadt) kutatóintézetben épülő új részecskegyorsító egyik fő célja.

Kulcsszavak: *elemi részecske, világegyetem, neutroncsillag, kvark, ráctérelmélet, gluon*

# POLIKRISTÁLYOS MEGSZILÁRDULÁS SZÁMÍTÓGÉPES MODELLEZÉSE

Gránásy László

az MTA doktora, tudományos főmunkatárs  
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet  
grana@szfki.hu

Pusztai Tamás

PhD, tudományos főmunkatárs  
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet  
pusztai@szfki.hu

Tegze György

PhD-hallgató, tudományos segédmunkatárs  
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet  
turpi@szfki.hu

## Bevezetés

Az emberiség által használt anyagok jelentős része *polikristályos*, azaz nagyszámú kristályszemcséből épül fel. Ide tartoznak a technikai ötvözetek (acél, bronz stb.), egyes élelmiszerek és gyógyszerek. Az ásványvilág sok csodája is polikristályos képződmény. Az újabb kutatások szerint polikristályos amiloid alakzatok jelennek meg az emberi szervezetben az Alzheimer-kór, illetve a II. típusú cukorbetegség során, és polikristályos képződmény a vesekő is. A polikristályos anyagok képződésének megértése tehát többirányú tudományos érdekessége mellett kiemelkedő gazdasági jelentőséggel is bír.

A polikristályos megszilárdulás leírásához olyan elméletre van szükség, amely alkalmas mind a kristályosodás megindulásakor felépő *kristálycsíra-képződés* (mellyel növekedésre képes kristályszemcsék jönnek létre), mind a *kristálynövekedés* leírására. A modern statisztikus fizikai módszerek és a rohamosan növekvő számítástechnikai kapacitás kombinációjával korábban megoldhatatlannak tűnő problémákra találhatunk megoldást. Az elmúlt évtized tapasztalatai alapján az ún. *fázismező-elmélet* a számítógépes anyagtudomány egyik leghatéko-

nyabb módszerének bizonyult (Boettinger et al., 2002; Hoyt et al., 2003). Ebben az egyszerű, klasszikus térbelméleti modellben a kristály-folyadék átmenetet a lokális fázisállapotot jellemző fázismező írja le, melynek időfejlődése más, lassan változó mezők – például összetétel, hőmérséklet, orientáció – időfejlődéséhez csatolódik.

Az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet (SZFKI) Röntgenlaboratóriumában – amerikai tudósokkal együttműködve – olyan világon egyedülálló számítógépes modellt fejlesztettünk ki, amely képes a polikristályos megszilárdulás valóságghű leírására.

## *A polikristályos megszilárdulás fázismező-elmélete*

Számítógépes modellünk alapjául a fázismező-elmélet olyan, általunk kidolgozott továbbfejlesztése szolgál, mely képes a különböző kristálytani orientációval létrejövő kristálycsírák képződésének leírására (Gránásy et al., 2002). Anélkül, hogy teljességre törekednénk, a továbbiakban röviden körvonalazzuk a fázismező-elmélet néhány alapvető vonását. A fázismező-modell olyan fenomenologikus térbelméleti leírás, melyben az anyag lokális állapotát több, ún. *rendparaméter* segítségével

jellemezzük. Ezek olyan lokálisan átlagolt fizikai tulajdonságok, melyek lényegesen eltérnek a két fázisban, és segítségükkel a szabadenergia kifejezhető. A kristály-folyadék átmenetet a *fázismező* írja le, melynek értéke egy és nulla között folyamatosan változik a kristály-folyadék határfelületen keresztül. Fázismező tehát olyan, a kristályban jelen levő szerkezeti tulajdonság lehet, amely eltűnik a folyadékban. További jellemzők a lokális *kémiai összetétel* és a *hőmérséklet*. A termikus kiegyenlítődés azonban többnyire gyorsan végbemegy, így jogos az állandó hőmérsékletű, ún. izoterm közelítés használata.

Az inhomogén kristályosodó folyadék szabadenergiáját több tag összegeként írhatjuk fel. Az egyik a fázismező térbeli változásához rendelhető többlet szabadenergia (ebből ered a fázishatárokon fellépő felületi energia), míg a második tag a lokális fázismező, illetve összetétel értékekhez tartozó szabadenergia. Ez utóbbi legalább két minimummal rendelkezik, melyek a makroszkopikusan megvalósuló stabil és metastabilis állapotoknak felelnek meg. Az olvadáspontja alá hűtött (ún. túlhűtött) folyadék kristályosodása esetén például a rendszer a metastabilis folyadékállapotot jellemző lokális minimumból a stabil kristályos fázist jellemző abszolút minimumba kerül át, mely folyamat során át kell jutnia a két minimum közt található szabadenergia-gáton. A rendszer időbeli fejlődése a szabadenergia-felület alakjától (a gát magasságától) és az atomi mozgékonyaságtól függ. A folyamatot leíró mozgásegyenletek erősen nem-lineárisak, meglehetősen bonyolultak, és megoldásukra csak a számítástechnika utóbbi évtizedben tapasztalt látványos fejlődése ad lehetőséget.

A fenti probléma tovább bonyolódik, ha több kristály egymással versengő növekedésének leírására van szükség, ekkor ugyanis meg kell különböztetnünk a különféle kristálytani orientációkat, azaz azt is meg kell adnunk, hogy az egyes kristályszem-

csek esetén a gyors növekedés iránya milyen irányba mutat. Két dimenzióban ezt a Ryo Kobayashi, James Warren és Craig Carter (1998) által bevezetett újabb, ún. *orientációs rendparaméter* teszi lehetővé, ami azt adja meg, hogy milyen irányban állnak a szerkezetet jellemző kristálysíkok. Két eltérő orientációjú kristályszemcse között kialakuló szemcsehatáron az orientációs rendparaméter értéke élesen változik, amihez a javasolt szabadenergia kifejezés extra energiát (a szemcsehatár energia) rendel.

Bár Kobayashi és munkatársai (1998) csak a kristályban értelmezték az orientációs rendparamétert, valójában a kristályos rend és ennek részeként a kristályorientáció is fokozatosan alakul ki a kristály-folyadék határterületen. A folyadék felé haladva „fellazul” a kristályos rend, és ennek részeként az orientációs rendezettség. E jelenség leírásához az orientációs rendparamétert a folyadék tartományokon is értelmeztük, ahol a lokális orientáció időben és térben korrelálatlanul ingadozik, amit az orientációs mozgásegyenlethez adott zaj biztosít. Ehhez az alábbi fizikai kép rendelhető: szóráskísérletet és a folyadékbeli atomi mozgások számítógépes szimulációja szerint a lokális atomi környezet (például az elsőszomszéd-környezet) még egyszerű folyadékokban sem teljesen rendezetlen, hanem többé-kevésbé hasonlít a kristálybeli elsőszomszéd-környezetre. Így ha megkeressük azt az irányt, melynél a tökéletes kristályos környezet a legjobban hasonlít a vizsgált folyadékatom elsőszomszéd-környezetére (például szögkorrelációt vizsgálunk), minden egyes folyadékatomhoz hozzárendelhetünk egy pillanatnyi orientációt. Ez az orientáció időben és térben ingadozik. Az illeszkedés nem szükségképp jó, ezt a másik szerkezeti rendparaméterünk, a fázismező értéke tükrözi. Ugyanez az eljárás a kristályos tartományokhoz jól meghatározott orientációt rendel. A kristályosodási fronton áthaladva a folyadékbeli véletlenül

ingadozó lokális orientáció fokozatosan beáll az adott kristályszemcsét jellemző irányba. Az orientációs szabadenergia általunk javasolt formája biztosítja, hogy az orientációs rendeződés a fázismező változásával (megszilárdulással) szinkronban lép fel.

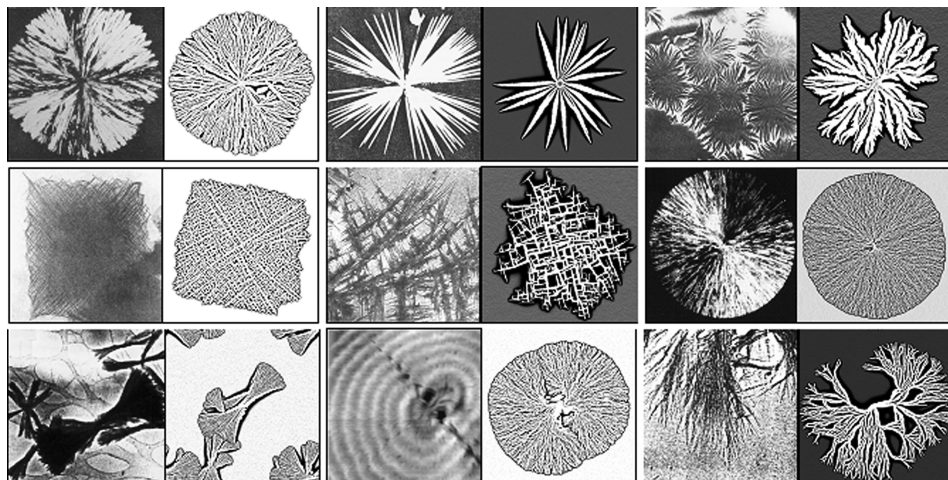
Az orientációs rendparaméter időfejlődését meghatározó orientációs mobilitás az orientációs egyensúly kialakulásának időskáláját rögzítő ún. rotációs diffúziós állandóval arányos. Ezzel szemben a növekedési sebességet meghatározó fázismező-mobilitás az ún. translációs diffúziós állandóval arányos. Komplex folyadékokban alacsony hőmérsékleten a rotációs diffúziós állandó jelentősen lecsökken a translációs diffúziós állandóhoz képest. Ennek tulajdonítható a polikristályos növekedési mintázatok megjelenése nagy túlhűtéseknel.

A fent említett a folyamatokban alapvető szerepet játszanak a véletlen atomi mozgások. A nem-egyensúlyi statisztikus fizika elvei szerint az átlagos viselkedésre származtatott mozgásegyenleteink determinisztikusak. A folyamatok statisztikus jellegének figyelembe vételéhez alkalmas „zajt” (megfelelő

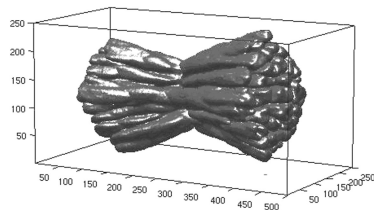
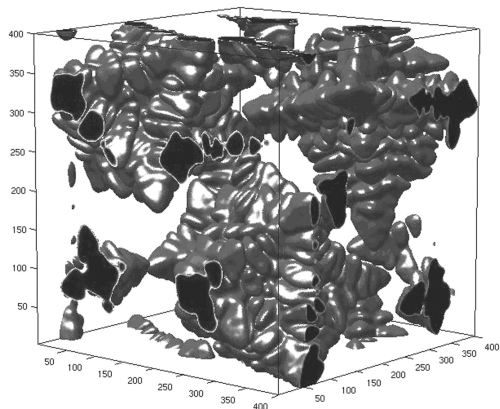
eloszlású és amplitúdójú véletlen számokat) adunk a mozgásegyenletekhez. Ez a zaj hozzá létre véletlen helyen, időben és orientációval a kritikus méretű kristályszemcséket, melyek aztán a felületi energia anizotrópiája és az anyag-, illetve energiatranszport instabilitásainak megfelelően fejlődnek tovább. Az eltérő orientációjú kristályszemcsék létrejöttének beépítésével egy új világ tárul ki előttünk. Olyan bonyolult polikristályos mintázatok leírása válik lehetővé, melyek modellezése korábban elképzelhetetlenektől (Gránásy et al., 2003, 2004a, 2004b, 2005).

### *Eredmények és visszhangjuk*

Modellünket alkalmassá tettük a szinte mindig jelen lévő idegen részecskék hatásának kezelésére, illetve a mélyen az olvadáspont alatt fellépő atomi folyamatok figyelembe vételére. Ezzel lehetővé vált a rendezetlen dendritek (Gránásy et al., 2003) és az ún. szferolitos morfológiák (1. ábra) leírása (Gránásy et al., 2005). Eredményeink 2004-ben több tudományos folyóirat címlapján szerepeltek (például *Nature Materials*, *Journal of Physics: Condensed Matter*, *Journal of Metals* [JOM]).



1. ábra · Polikristályos szferolit morfológiák a természetben és a fázismező-elméletben. Az egymáshoz tartozó kísérleti és szimulációs alakzatok párokban kerülnek bemutatásra: balra a kísérlet látható, jobbra a szimuláció.



2. ábra • Dendrites (balra) és kristálykéve (jobbra) alakzatok a háromdimenziós fázismező-elméletben.

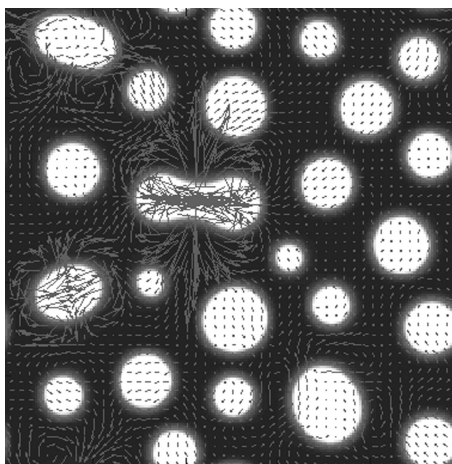
A Gránásy László és munkatársai 2004a közleményében ismertetett munkánkat a *Science News* folyóirat a 2004-es év során fizikában elért 15. legfigyelemreméltóbb eredményeként említi (Staff of Science News, 2004).

2005-ben japán és amerikai kutatókkal egy időben fejlesztettük ki a fenti modell háromdimenziós általánosítását, és elsőként alkalmaztuk azt komplex háromdimenziós polikristályos szerkezetek leírására (2. ábra) (Pusztai et al., 2005). Kutatócsoportunk jelenleg a hidrodinamikai áramlások és a fázisátmenetek kapcsolatát vizsgálja a fázismező-elmélet keretében (3. ábra).

A közleményeinkben ismertetett számítások mindegyike az SZFKI-ban történt, melyek elvégzésére egy hatvan és egy száz személyi számítógépből álló számítógépklasztert hoztunk létre.

Bár eredményeink elsősorban alapkutatási jellegűek, nélkülözhetetlenek a tudományos igényű anyagtervezés megalapozásához. Ez tükröződik abban, hogy a fenti kutatások anyagi háttérét az Európai Unió 6. Keretprogramja által támogatott IMPRESS projekt, illetve az Európai Űrtügyökség/Magyar Űrkutatási Iroda által odaítélt ESA Prodex/PECS pályázatok biztosítják, melyek célja gazdaságosabb gázturbinák, javított tu-

lajdonságú mágneses és kompozitanyagok, valamint környezetbarát csapágyanyagok kifejlesztése, illetve az ehhez szükséges elméleti/gyakorlati tudás létrehozása.



3. ábra • Cseppek hidrodinamikai kölcsönhatása folyadékállapotbeli fázisátmenet során a környezetbarát önkénő csapágyanyagok kifejlesztése szempontjából érdekes Al-Bi monotektikus ötvözetben. Az ábrán az összetétel térkép pillanatfelvétele látható (a fekete és fehér tónusok a koegzisztáló folyadékfázisokat jelölik). A szürke nyilak a sebességet jellemzik.

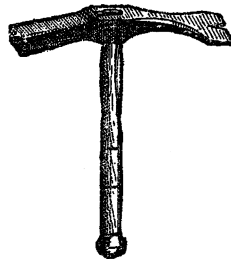


Kulcsszavak: *polikristályos megszilárdulás, fázismező-elmélet, számítógépes szimuláció, kristálycsíra-képződés, kristálynövekedés, dendrit, szferolit, számítógépes anyagtudomány*

---

**IRODALOM**

- Boettinger, William J. - Warren, J. A. - Beckermann, C. - Karma, A. (2002): Phase Field Simulation of Solidification. Annual Review of Materials Research. 32, 163-194.
- Gránásy László - Börzsönyi T. - Pusztai T. (2002): Nucleation and Bulk Crystallization in Binary Phase Field Theory. Physical Review Letters. 88, 206105-1-4.
- Gránásy László - Pusztai T. - Warren, J. A. - Douglas, J. F. - Börzsönyi T. - Ferreira, V. (2003): Growth of "Dizzy Dendrites" in a Random Field of Foreign Particles. Nature Materials. 2, 92-96.
- Gránásy László - Pusztai T. - Börzsönyi T. - Warren, J. A. - Douglas, J. F. (2004a): A General Mechanism of Polycrystalline Growth. Nature Materials. 3, 645-650.
- Gránásy László - Pusztai T. - Warren, J. A. (2004b): Modelling of Polycrystalline Solidification Using Phase Field Theory. Journal of Physics: Condensed Matter. 16, R1-R31.
- Gránásy László - Pusztai T. - Tegze G. - Warren, J. A. - Douglas, J. F. (2005): Growth and Form of Spherulites. Physical Review E. 72, 011605-1-15.
- Hoyt, Jeffrey J. - Asta, M. - Karma, A. (2003): Atomistic and Continuum Modeling of Dendritic Solidification. Materials Science and Engineering R. 41, 121-163.
- Kobayashi, Ryo - Warren, J. A. - Carter, W. C. (1998): Vector-Valued Phase Field Model for Crystallization and Grain Boundary Formation. Physica D. 119, 415-423.
- Pusztai Tamás - Bortel G. - Gránásy L. (2005): Phase Field Theory of Polycrystalline Solidification in Three Dimensions. Europhysics Letters. 71, 131-137.
- Staff of Science News (2004): Science News of the Year 2004. Science News. 166, 405. Ld. <http://www.sciencenews.org/articles/20041218/bob21.asp#physics>



# A RÖNTGENDIFFRAKCIÓS SPEKTRUM MINT A MIKROSZERKEZET UJJLENYOMATA

Groma István

az MTA doktora, ELTE Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszék

Lendvai János

az MTA doktora, ELTE Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszék  
lendvai@metal.elte.hu

Ungár Tamás

az MTA doktora, ELTE Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszék

## *Röntgen vonalprofil-analízis*

Röviddel a röntgendiffrakció felfedezése után, az 1920-as években meglepetést okozott, hogy képlékenyen alakított fémek diffrakciós spektruma nem teljesen elmosódott diffúz szórást, hanem viszonylag éles maximumokat mutat. A hibátlan, tökéletesen szabályos kristályok diffrakciós maximumai, az ún. kinematikus szórás feltételeinek a teljesülése mellett, végtelenül éles delta-függvények. A valódi kristályos szerkezetnek a „tökéletestől” való bármilyen eltérése azt eredményezi, hogy a diffrakciós maximumok intenzitáseloszlása eltér a delta-függvény típusútól. Ezeknek a viszonylag éles maximumoknak az igazán éles, delta-függvényyszerű diffrakciós maximumoktól való eltérése az a jelenség, amit röntgen vonal szélesedésnek nevezünk, és aminek vizsgálatával az ún. vonalprofil-analízis foglalkozik. A kristályszerkezetnek a „tökéletestől” való eltéréseit összefoglalóan mikroszerkezetnek nevezzük, és különböző kristályhibákkal jellemezzük. A leggyakrabban előforduló kristályhibák a rácslukak (vakanciák), a külső

és belső határfelületek (szemcse-, fázis-, doménhatárok), a képlékeny deformációval kapcsolatos vonalhibák, a diszlokációk stb. A vonalprofil-analízis célkitűzése az, hogy mind kvalitatívan, mind kvantitatívan kapcsolatot teremtsen a diffrakciós spektrum tulajdonságai és a mikroszerkezet elemei között. Ha ez a kapcsolatteremtés sikeres, akkor azt mondhatjuk, hogy a diffrakciós spektrum, mint vonalprofilok összessége, a mikroszerkezet „ujjlenyomata”.

A mikroszerkezet vizsgálatának általánosan elterjedt direkt módszerei a különböző elektronmikroszkópiai eljárások, nevezetesen az átvilágító vagy transzmissziós (TEM), illetve a pásztázó vagy scanning (SEM) elektronmikroszkópia. A röntgen vonalprofil-analízis (RVA) sok tekintetben alternatív, ugyanakkor kiegészítő módszere a mikroszerkezet vizsgálatának. A szemcseméret például meghatározható mind a TEM, mind a RVA módszerével. Igen sok esetben a két módszer eredményei kitérően egyezést mutatnak. Ionos vagy kovalens kristályok szubmikron méretű laza poraiból álló minták esetén az egyezés igen jó. Vizsgálataink szerint ugyancsak nagyon jó

az egyezés számos különböző módszerrel előállított nanoszerkezetű anyag esetén a kétféle módszerrel meghatározott szemcseméret-értékek és szemcseméret-eloszlások között. Ugyanakkor vannak jól definiálható esetek, amikor a TEM krisztallit, illetve szemcseméret-értékek határozottan és jelentősen nagyobbak, mint amiket a RVA módszere szolgáltat. Részletes vizsgálataink azt mutatják, hogy ezen utóbbi diszkrepanciának jól meghatározható fizikai oka van, és ebben az értelemben maga a diszkrepancia további értékes információt szolgáltat a mikroszerkezet további finomabb részleteinek a feltárásához. Megmutatható ugyanis, hogy a diszlokációk rendeződhetnek olyan cella- vagy szubszemcse-konfigurációba, ahol a szomszédos szubszemcsék között nincsen orientációkülönbség, mégis eltolódnak egymáshoz képest a szomszédos tartományok kristályrácsai. Ez az eltolódás egy olyan fázistolást jelent, ami megszünteti a röntgenszórás koherenciáját, így ezek a szubszemcsék felelnek meg a röntgenes szemcseméret objektumainak. Ugyanakkor az elektronmikroszkópban ezek a tartományok nem különböztethetők meg mint különálló szubszemcsék. A TEM és RVA közötti diszkrepancia tárgykörébe tartozik az az újólag felfedezett interferenciajelenség, amelynek elsődleges megjelenési formájában a TEM szemcseméret – éppen ellenkezőleg, mint az iménti példában – lényegesen kisebb, mint amit a RVA alapján kapnánk. Sikerült megmutatnunk, hogy a jelenség magyarázata egy, a mikroszerkezet speciális jellege által kiváltott röntgen-interferencia, ami jelentős vonalkeskenyedést okoz.

A szemcseméret meghatározása mellett a RVA másik igen fontos alkalmazási területe az ún. mikrodeformációk meghatározása. Mikrodeformációnak nevezzük általában az olyan deformációkat, amelyeknek a térbeli átlaga zérus. Tipikusan ilyen az inhomogén deformációs teret létrehozó kristályhibák

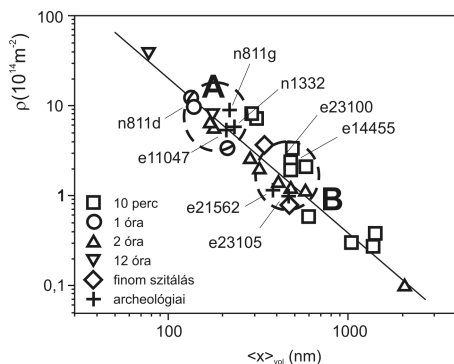
deformációja, amelyeknek a prototípusát képezik a diszlokációk. A diszlokációk a kristályos anyagok mikroszerkezetében talán a legfontosabb szerepet játszó kristályhibák. Meghatározó szerepük van a szilárdság és a képlékenység kialakulásában, és szinte elkerülhetetlenül jelen vannak a kristályos anyagok szinte valamennyi formájában. Az elektronmikroszkópban a diszlokációk kontrasztja átlapolóvá válik, amikor azok sűrűsége (az egységnyi térfogatban található diszlokációvonalak hosszának összege) meghaladja a mintegy  $10^{14}$  m<sup>-2</sup> értéket. Ilyen és ennél nagyobb diszlokációs-sűrűségek esetén a RVA szinte az egyetlen igazán megbízható módszer, amellyel diszlokációk sűrűségét, azok térbeli fluktuációját és még további számos tulajdonságát, mint például a dipól polarizációt vagy az általuk okozott belső feszültségeket, vizsgálhatjuk, illetve meghatározhatjuk. Ezeket a vizsgálatokat az utóbbi évtizedekben elért elméleti eredmények tették lehetővé, amelyekhez az ELTE Anyagfizikai Tanszékén (korábbi nevén Általános Fizika Tanszék) dolgozó kutatók jelentősen hozzájárultak (Ungár et al., 1984; Groma et al., 1988; Ungár et al., 1989). Az elméleti eredmények alapján kidolgozott új kiértékelési eljárások teszik lehetővé, hogy a szemcse- és a diszlokációs szerkezet számos fontos paramétere RVA segítségével nagy pontossággal meghatározható (Révész et al., 1996; Ungár et al., 1998; Borbély et al., 2001).

Összefoglalóan azt mondhatjuk, hogy a diffrakciós kép tartalmaz olyan információkat a kristályos anyagok mikroszerkezetéről, amelyek alapján a krisztallitméretet és a deformációs típusú kristályhibákat meghatározhatjuk. Az alábbiakban néhány példát mutatunk a módszer alkalmazására.

#### *Az ókori egyiptomi szemfestékek gyártási technológiájának felderítése*

Az egyiptomi királyságok korából származó sírokból kicsiny kerámia-, fa- vagy

nádfiolákban rengeteg különböző kozmetikum került elő, amelyeknek jelentős része jól konzerválódott, megőrizve azt az állapotot, amelyben több ezer évvel ezelőtt előállították őket. A párizsi Louvre régészei és krisztallográfusok egy csoportja szinkrotron mellett végzett pordiffrakció alapján megállapította, hogy a 2-3000 éves egyiptomi szemfestékek egyik legáltalánosabb alapanyaga, a világítóan fekete ólomszulfid (PbS), ásványi nevén galenit. Ezt követően a Louvre kutatóival közösen azt a kérdést kívántuk megválaszolni, hogy milyen fejlettségi szinten dolgoztak a kozmetikumokat előállító kézművesek az ősi Egyiptomban (Ungár et al., 2002). Tiszta PbS mintákat különböző ideig golyós malomban őröltünk, és ezeket a porokat szobahőmérséklet és 800 °C között különböző hőmérsékleteken hőkezeltük. Az így előállított mintasorozat minden egyes tagján az RVA módszerével meghatároztuk a szemcseméretet és méreteloszlást, valamint a diszlokációsűrűséget. Ugyanezt a RVA-t elvégeztük mintegy 10-12 régészeti szemfestékmintán is. A mesterséges minták szemcseméret és diszlokációsűrűség paraméter



1. ábra • A diszlokációsűrűség a térfogatra átlagolt krisztallitméret függvényében. A nyitott szimbólumok a tíz percig, illetve 1, 2 és 12 óra őrléshez és azt követő, különböző hőmérsékletű hőkezelésekhez tartoznak. A csúcsán álló nyitott négyyszög egy szitált mintának felel meg. A keresztek az archeológiai mintáknak felelnek meg.

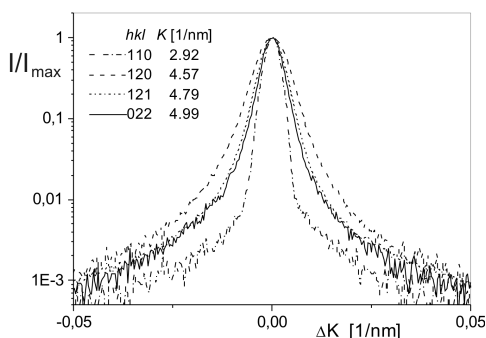
mátrixába beillesztve az archeológiai szemfestékminták megfelelő paraméterértékeit, jó közelítéssel meg tudtuk állapítani, hogy az egyiptomi kézművesek milyen mértékben őrölték, illetve milyen hőmérsékleteken hőkezelték a kozmetikumokhoz használt ásványi anyagaikat.

Az 1. ábra diszlokációsűrűsége mutatja a térfogatra átlagolt szemcseméret függvényében. A nyitott szimbólumok a tíz percig, illetve 1, 2 és 12 óra őrléshez és azt követő, különböző hőmérsékletű hőkezelésekhez tartoznak. A csúcsán álló nyitott négyyszög egy szitált mintának felel meg. Az régészeti minták megfelelő paraméterértékeit kereszttel jelöltük. Megfigyelhető, hogy a régészeti minták két nagyobb csoportban különülnek el. A megvizsgált régészeti szemfestékmintáknál alkalmazott legvalószínűbb őrlési és hőkezelési eljárásokat figyelembe véve megállapítható, hogy az **A** tartományhoz tartozó régészeti minták a szobahőmérsékleten 10-60 percig őrölt laboratóriumi mintához állnak legközelebb. A **B** tartományhoz tartozó régészeti minták pedig a szitált, valamint a rövid ideig, mintegy tíz percig őrölt és 300 °C-nál nem magasabb hőmérsékleten hőkezelt laboratóriumi minták állapotaihoz állnak közel. Eredményeink alapján megállapítható, hogy az ősi Egyiptomban kozmetikumokkal foglalkozó kézművesek nem alkalmaztak sem különösebben bonyolult, sem pedig különösebben fáradságos technológiai eljárásokat az igen változatos szín- és csillogáshatásokat mutató szemfestékek előállításánál.

*Az alsó földkéreg felső rétegeiben található  $MgSiO_3$  perovszkit plaszticitása*

Mind a felső, mind az alsó földkéreg állandó mozgásban van. Az egymás fölé, alá és mellé kerülő kéreglemezek, illetve kőzetdarabok egymáshoz illeszkedése csak jelentős alakváltozások révén mehet végbe. A mélyebben fekvő kéregtartományok

plasztikus tulajdonságait csak laboratóriumi körülmények között szintetizált mintákon és a mélyen fekvő nyomás- és hőmérsékleti viszonyok laboratóriumi beállításával tudjuk vizsgálni. Az alsó földkéreg felső rétegeiben, ami mintegy 800 km mélységnek, 25 GPa nyomásnak és 1400 °C hőmérsékletnek felel meg, a kéreganyag egyik fő komponense a (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> perovszkit. Az ortorombos perovszkit plasztikus viselkedésének megértéséhez a csúszási rendszereket és az aktív Burgers-vektorokat kell meghatározni. Szobahőmérsékleti, környezeti körülmények közé befagyasztható geológiai minták esetében ennek szokásos módja a Burgers-vektor analízis a transzmissziós elektronmikroszkópia módszerével. Az 1400 °C-on 23 GPa mellett szintetizált MgSiO<sub>3</sub> perovszkit környezeti körülmények közé jól befagyasztható, de az elektronmikroszkópban, az elektronsugár hatására azonnal amorfizálódik. A problémát a RVA módszerével oldottuk meg (Cordier et al., 2004). Az MgSiO<sub>3</sub> perovszkitot a németországi Bayerisches Geoinstitut nagynyomású laboratóriumában szintetizáltuk. A mintegy 1 mm átmérőjű minta 5-6 kristallitból állt. Kiválasztottuk az egyik 0,4 mm átmérőjű kristallitot, amelynek meghatároztuk az orientációját, majd kétkristályos,



2. ábra • Az MgSiO<sub>3</sub> perovszkit néhány jellegzetes vonalprofilja logaritmusos intenzitás skálában az intenzitás maximumára normálva.  $K=2\sin\theta/\lambda$  és  $\Delta K=(2\cos\theta/\lambda)\Delta\theta$ , ahol  $\theta$  és  $\lambda$  a Bragg-szög, illetve a sugárzás hullámhossza.

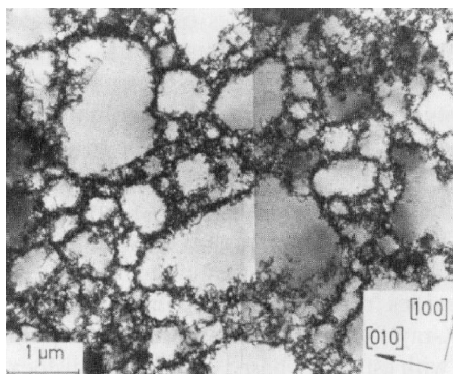
nagy szögfelbontású diffraktométerben megmértük tizenegy különböző indexű diffrakciós csúcának intenzitáseloszlását.

A 2. ábra jellegzetes vonalprofilokat mutat logaritmusos intenzitásslábalban. Az ábrán megfigyelhető, hogy a reflexiók kiszélesedése nem követi az elhajlási rendek sorrendjét. A jelenséget deformációs anizotrópiának nevezzük, amit a diszlokációk anizotrop elmozdulástere okoz. A deformációs anizotrópiát használtuk ki ahhoz, hogy meghatározzuk a perovszkitban az aktív Burgers-vektorokat és csúszási rendszereket, amelyek végül a perovszkit plaszticitását megadják. A mérések és a lehetséges modellek összevetése azt mutatták, hogy az ortorombos elemi cellának csak a két legrövidebb, (100) és (010) vektorai működnek mint aktív Burgers-vektorok. Figyelemreméltó, hogy ezeket a kísérleti eredményeket utólag atomisztikus szimulációk is alátámasztották.

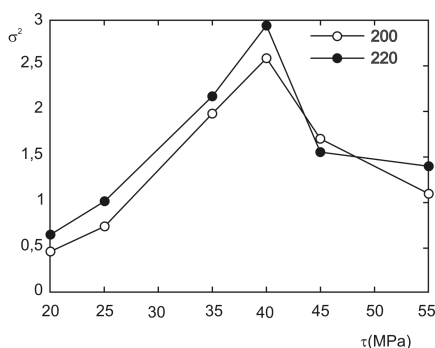
#### *Diszlokáció-mikroszerkezet statisztikus paramétereinek változása a deformáció során*

Azóta, hogy mintegy ötven évvel ezelőtt a diszlokációt először TEM-mel megfigyelték, ismert, hogy a deformáció során keletkező diszlokációk különböző diszlokációmintázatokat alakítanak ki. A mintázatok a deformáció módjától függően nagyon különbözők lehetnek. Bizonyos esetekben periodikus diszlokációszerkezetek alakulnak ki, amelyeknek karakterisztikus mérete mikron nagyságrendű. Máskor azonban fraktálszerű skálázási tulajdonságokat mutató diszlokációmintázatok keletkeznek. Húzással deformált Cu egykristályban kialakuló fraktálszerű diszlokációszerkezetet mutat a 3. ábra.

A mintázatképződés okainak megértése a diszlokációelmélet egyik legnagyobb, igen intenzíven kutatott kihívása. A problémakörnek kiemelt jelentőséget ad a nanotechnológia rohamos fejlődése. Ugyanis kísérleti eredmények tanúsága szerint mikronos méret



3. ábra • Húzással deformált Cu egykristályban kialakuló fraktálszerű diszlokációszerkezet.



4. ábra • A diszlokációsűrűség relatív térbeli fluktuációja az alkalmazott feszültség függvényében összenyomással deformált Cu egykristály esetében. Az adatok a 200, illetve a 220 reflexióhoz tartozó röntgen Bragg-csúcs kiszélesedéséből kerültek meghatározásra.

alatt a méret csökkenésével a kristályos anyagok deformációs tulajdonsági jelentősen változnak. Ennek magyarázata a diszlokációk kollektív tulajdonságaiban keresendő.

A modellalkotás szempontjából döntő fontosságú a diszlokációszerkezetek sta-

tisztikus tulajdonságainak ismerete. Ennek feltérképezésére a RVA unikális lehetőséget szolgáltat. Az utóbbi években elvégzett elméleti vizsgálataink szerint egykristályok esetében a kiszélesedett diffrakciós csúcsok lecsengő részének alakját az átlagos diszlokációsűrűség és annak átlagos térbeli fluktuációja határozza meg (Groma, 1998). Ez lehetőséget ad ennek a két paraméternek az igen pontos meghatározására. (Borbély et al., 2001).

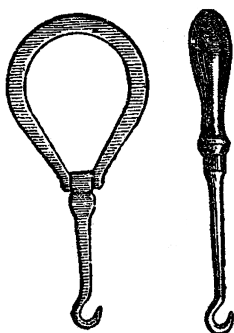
Különböző mértékig összenyomással deformált Cu egykristályokon végzett RVA méréseink tanulsága szerint miközben a diszlokációsűrűség monoton növekszik, a deformáció növelésével a diszlokációsűrűség relatív fluktuációja egy bizonyos deformációnál éles maximumot mutat (4. ábra) (Székely et al., 2001). Felmerül a kérdés; vajon a diszlokációsűrűség mellett más fizikai mennyiségek térbeli relatív fluktuációja is hasonló viselkedést mutat-e. A mintákon elvégzett nanokeményesség-mérések azt mutatják, hogy a keménység fluktuációjában ugyanúgy megfigyelhető az éles maximum.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy ez a korábban nem ismert jelenség azt mutatja, hogy kezdetben a diszlokációszerkezet mindinkább inhomogénné válik, majd egy bizonyos diszlokációsűrűségnél ez a folyamat hirtelen megáll, és a diszlokációk egyre homogénebben töltik ki a mintát. A rendszerben egy strukturális átalakulás zajlik le, amely hasonlóságokat mutat a másodrendű fázisátalakulásokkal.

Kulcsszavak: *deformációs szerkezet, diszlokációszerkezet, szemcseméret, mintázat-képződés, nanokristályos anyagok*

**IRODALOM**

- Borbély András – Groma István (2001): Variance Method for the Evaluation of Particle Size and Dislocation Density from X-ray Bragg Peaks. *Applied Physics Letters*. **79**, 12, 1772–1774.
- Cordier, Patrick – Ungár T. – Zsoldos L. – Tichy G. (2004): Dislocation Creep in MgSiO<sub>3</sub> Perovskite at Conditions of the Earth's Uppermost Lower Mantle. *Nature*. **428** 837–840.
- Groma István – Ungár T. – Wilkens, M. (1988): Asymmetric X-ray Line Broadening of Plastically Deformed Crystals. I. Theory. *Journal of Applied Crystallography*. **21**, 47.
- Groma István (1998): X-ray Line Broadening Due to an Inhomogeneous Dislocation Distribution. *Physical Review B*. **57**, 7535.
- Révész Ádám – Ungár T. – Borbély A. – Lendvai J. (1996): Dislocations and Grain Size in Ball-Milled Iron Powder. *Nanostructured Materials*. **7**, 779.
- Székely F. – Groma I. – Lendvai J. (2001): Changes in the Dislocation Density Fluctuation During Plastic Deformation. *Scripta Materialia*. **45**, 1, 55–60.
- Ungár Tamás – Mughrabi, H. – Roennpagel, D. – Wilkens, M. (1984): X-ray Line Broadening Study of the Dislocation Cell Structure in Deformed [001]-oriented Copper Single Crystals. *Acta Metallurgica*. **32**, 333.
- Ungár Tamás – Groma, I. – Wilkens, M. (1989): Asymmetric X-ray Line Broadening of Plastically Deformed Crystals. II. Evaluation Procedure and Application to [001]-Cu Crystals. *Journal of Applied Crystallography*. **22**, 26–34.
- Ungár Tamás – Dragomir, I. – Révész Á. – Borbély A. (1999): The Contrast Factors of Dislocations in Cubic Crystals: The Dislocation Model of Strain Anisotropy in Practice. *Journal of Applied Crystallography*. **32**, 992–1002.
- Ungár Tamás – Martinetto, P. – Ribárik G. – Dooryhee, E. – Walter, Ph. – Anne, M. (2002): Revealing the Powdering Methods of Black Makeup in Ancient Egypt by Fitting Microstructure Based Fourier Coefficients to Whole X-Ray Diffraction Profiles of Galena. *Journal of Applied Physics*. **91**, 2455–2465.



# SZUPERSZIMMETRIKUS RÉSZECSKÉK KERESÉSE A CERN-BEN<sup>1</sup>

Horváth Dezső

MTA doktora, tudományos tanácsadó  
KFKI RMKI, Budapest, ATOMKI, Debrecen  
horvath@sunserv.kfki.hu

## *1. A Standard Modell és a szuperszimmetria*

A szimmetriák a részecskefizikában még fontosabb szerepet játszanak, mint a kémiában vagy a szilárdtestfizikában. Amíg az utóbbiakban az anyagok fontos tulajdonságai vezethetők vissza a különböző atomi, molekula- és kristályrács-szimmetriákra, a részecskefizikában gyakorlatilag minden a szimmetriákból (vagy azok sérüléséből) származik: az összetett részecskék szerkezetén kívül a megmaradási törvények, a kölcsönhatások, sőt a részecskék tömege is.

A részecskefizika Standard Modellje (SM) immár több mint harmincéves. Alapvető alkotórészei a kétszer három pár pontszerű fermion, a leptonok és a kvarkok, és a három helyi szimmetria, amelyből a három kölcsönhatás és tizenkét közvetítő bozonja (a foton, a három gyenge bozon és a nyolc gluon) származtatható a szimmetriasértő Higgs-tér áldásos közreműködésével, amely utóbbi melléktermékeként megjelenik a Higgs-bozon. A leptonok közé tartozik az elektron és a neutrínók, és a kvarkok alkotják az összes erősen kölcsönható részecskét, mint a proton, a neutron vagy a mezonok.

A Standard Modell helyességét számtalan kísérleti megfigyelés igazolja. Mindjárt születésekor számszerűen megjósolta a gyenge

bozonok tömegét és más tulajdonságait, amit a kísérlet később teljes mértékben igazolt (Carlo Rubbia és társai, Nobel-díj, 1984). A létrehozása óta eltelt csaknem harminc év alatt a kísérlet minden jóslatát teljes mértékben igazolta, semmiféle olyan megfigyelésünk nincs, amely ellentmondana neki. A Higgs-bozon kivételével valamennyi alkotórészét megfigyeltük, utójára a legnehezebb kvarcot, és a Természet vakon engedelmessé válni látszik neki. Még az az új megfigyelés sem mond igazán ellent a Standard Modellnek, hogy a neutrínóknak lehet némi (igen kicsi) tömegük. Valahányszor egy-egy kísérleti eredmény hibahatáron kívül eltér a SM által számítottól, felbolydulnak a kedélyek, és elméleti cikkek tucatjai igyekeznek a SM-től eltérő, alternatív megoldást kínálni az eltérés feloldására. Sajnos ezidáig a mérések és számítások pontosításával ezek az eltérések rendre eltűntek.

De miért sajnós? Miért nem vagyunk boldogok, hogy a mikrovilág problémaköre megoldott, és térünk át más tudományterület művelésére? Mi szükség van még gyorsítókra, és egyáltalán részecskefizikusokra, ha egyszer ilyen, mindent helyesen leíró elmélettel rendelkezünk? A válasz a Standard Modell nevében rejlik: nem teljes elmélet, csak modell, amelyről nem igazán értjük, miért működik ilyen jól. Három remek elméletet, a három kölcsönhatását, jó néhány szabad paraméterrel ellátva összeházasítottunk;

<sup>1</sup> A munka támogatói a T042864 és T046095 OTKA-pályázat, valamint a TOK509252 Marie Curie-projekt.



megfejtük egy ad hoc Higgs-mechanizmussal, mert különben nem működik; mesterségesen hozzátettük a fermionok tömegét, és annak örülünk, hogy mindezt hagyja, azaz nem vezet elméleti ellenmondásokra. Nem sikerült még észlelnünk a modell kulcsfiguráját, a Higgs-bozont, amelynek léte és tulajdonságai bizonyítanák a Standard Modell érvényét. A SM jó pár belső elméleti problémája mellett vannak jelei annak, hogy a Standard Modell mögött egységes, mélyebb elmélet lehet. Erre vall az a megfigyelés, hogy a három kölcsönhatás erőssége, azaz csatlósi állandója az energia növelésével hasonló érték felé tart, tehát mintha egy univerzális kölcsönhatásra lennének visszavezethetők. Rengeteg problémát vet fel az asztrofizika is: nem értjük, miért nincs az Univerzumban jelentős mennyiségben antianyag, és nem tudni, mi alkotja a Világegyetem tömegének túlnyomó részét adó sötét anyagot és sötét energiát. Ráadásul, a gravitáció általában nem illik bele a Standard Modellbe, nem vezethető be lokális mértékszimetriával.

Kiküszöbölendő a fenti problémákat, az elmúlt három évtizedben a Standard Modellnek számos kiterjesztése született, és a jövő kísérleteinek kell döntenie, melyik írja le közülük helyesen a mikrovilágot. Közülük a részecskefizikusok körében ma a szuperszimmetria (SUSY) a legnépszerűbb, bár igazát egyelőre semmiféle kísérleti megfigyelés nem bizonyítja. Szimetriát feltételez a fermionok és bozonok között, tehát azt, hogy minden ismert fermionnak és bozonnak van szuperszimmetrikus partnere: a feles spinű leptonoknak és kvarkoknak zérus spinű szleptonok és szkvarok, a kölcsönhatásokat közvetítő, egyes spinű bozonok (a foton, a  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  gyenge bozonok és a nyolc gluon) szuperpartnerei a feles spinű fotinó, wínó, zínó és a gluínók, a zérus-spinű Higgs-bozoné pedig az ugyancsak feles spinű higgszínó. A feltételezett szuperszimmetria alacsony energián természetesen sértül, hiszen szu-

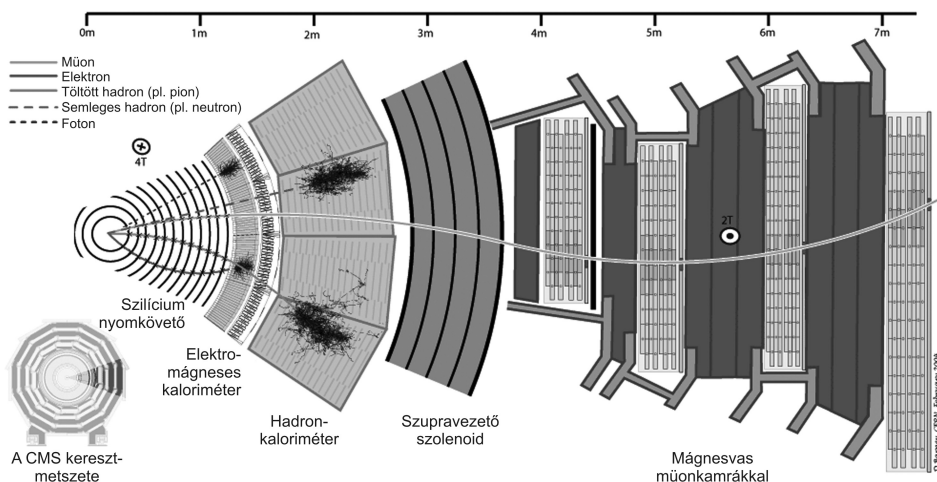
perpartnereket az eddigi gyorsítóknál nem láttunk, ha tehát egyáltalán léteznek, a tömegüknek a közönséges részecskékénél sokkal nagyobbak kell lenniük.

A Standard Modell lehető legegyszerűbb szuperszimmetrikus kiterjesztése, a Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell (MSSM) az elmélet csaknem valamennyi problémáját tetszetősen megoldja, de igen nagy áron: a rengeteg új részecske mellett igen sok új paraméter bevezetésével. Az utóbbi években érdekes versenyfutásnak vagyunk tanúi a kísérleti és elméleti kutatók között: a kísérletiek hiába igyekeznek megfigyelni a megjósolt új szuperpartnereket, és eközben mind nagyobb részeket zárnak ki a lehetséges paraméterértékek terében; eközben az elméletiek, számításaik, modelljeik finomításával egyre növelik az elméleti alapon megengedett és kísérletileg még nem tanulmányozott paramétertartományokat.

## 2. Az LHC CMS-együttműködése

A CERN Nagy Hadron-ütköztetője (Large Hadron Collider – LHC) várhatóan 2007-ben kezd működni, és 2008-tól szolgáltat majd új kísérleti adatokat. Elsődleges célja a Higgs-bozon (bozonok) és az esetleges SUSY-részecskék megfigyelése. Négy óriási detektora közül kettőben vesz részt jelentős magyar csoport: a nehézion-ütközésekre szakosodott ALICE (A Large Ion Collider Experiment) kísérletben Lévai Péter (RMKI) vezetésével, és az általános célú (mind proton-proton, mind Pb-PB ütközések analizálására készülő) CMS (Compact Muon Solenoid) kísérletben, amelynek magyar csoportját Vesztergombi György (RMKI) vezeti. Az említett két kísérletben magyar részről az ATOMKI, a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszéke, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Atomfizikai Tanszéke és az RMKI kutatói vesznek részt.

A CMS és az ATLAS, a másik részecskefizikai LHC-kísérlet, a világ legnagyobb együttműködései, egyenként több mint kétezer



1. ábra • A CMS-detektor nyálábra merőleges szelete és a különböző részecskék észlelése. A töltött részecskék görbült nyomát kirajzolja a nyomkövető (tracker). Az elektronokat és fotonokat az elektromágneses kaloriméter teljesen elnyeli, amíg a gyors müonok és pionok alig hagynak energiát benne. A hadronokat elnyeli a hadron-kaloriméter, a gyors müonok kétfelé görbülő pályáját pedig a vasrétegek közé helyezett müonkamrák követik ([http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMSdocuments/DetectorDrawings/Slice/CMS\\_Slice.gif](http://cmsinfo.cern.ch/outreach/CMSdocuments/DetectorDrawings/Slice/CMS_Slice.gif)).

kutató vesz részt bennük. Ellentétben a négy néhai LEP-kísérlettel, amelyek hasonló felépítésű detektorokkal rendelkeztek, az ATLAS és a CMS egészen más megoldásokkal igyekszik az LHC működése során észlelt valamennyi érdekes eseményt feldolgozni. Az alapelv természetesen ugyanaz: kiválasztani a másodpercenkénti mintegy 800 millió proton-proton ütközésből azokat, amelyek új fizikával kecsegtetnek, meghatározni és regisztrálni az azokban keletkező valamennyi részecske típusát, pályáját és energiáját. A részecskefizikai detektorok manapság mind mágneses kaloriméterek: a mágneses térben görbült pálya segít a részecske töltésének, tömegének és sebességének (ez az LHC-energiákon már többnyire fénysebesség) meghatározásában. A kireptülő részecskék pályáit az ütközési pont közelében finomfel-

bontású félvezető detektorok vagy sokszálas számlálók mérik, mögöttük a fotonok és elektronok teljes elnyelését szolgáló (és így az energiájukat mérő) elektromágneses kaloriméter, majd a mezonokat és nukleonokat elnyelő hadron-kaloriméter található. A gyors müonok nem állíthatók meg, ezért a detektorokat kívülről müonkamrák veszik körül.

Az 1. ábra a detektor egyes részeinek funkcióját illusztrálja a különböző részecskefajták észlelési módjával. Mágneses terét a világ pillanatnyilag legnagyobb szupravezető szolenoidja biztosítja: a 6 méter átmérőjű, 13 m hosszú hengerben 4 T mágneses tér lesz, és több vas veszi körül, mint amennyi a párizsi Eiffel-toronyban van. Nyomkövető rendszeréhez valóságos tudományos tragédia kapcsolódik: különböző országok laboratóriumaiban mintegy hetven kutató dolgozott több mint tíz éven át a CMS belsejébe szánt MSGC (microstrip gas chamber) kidolgozásán, de mire a gyártásról kellett

2 A protoncsomagok 25 ns-os időközönként követik egymást, a gyorsító teljes kapacitása idején ütközésenként mintegy húsz proton-proton kölcsönhatás várható (<http://lh.web.cern.ch/lhc/>).

dönteni, a félvezető eszközök ára annyira lement, hogy a kitűnő fejlesztés ellenére a kol-laboráció úgy döntött: a sokkal egyszerűbben üzemeltethető félvezető-detektorokból építi meg. Az elektromágneses kaloriméter 80 ezer ólom-volframát kristályból áll, a hadron-kaloriméter pedig orosz hadihajók lövedékhüvelyeiből visszanyert rézbe ágyazott szcintillátor-lapokból.<sup>3</sup>

A CMS-detektorhoz kétféle magyar hozzájárulás is történt. Az RMKI az egészen előreszórt részecskék észlelésére szolgáló *Very Forward* kaloriméter megépítésében segédkezett a munka valamennyi fázisában: ehhez, például, többtonnás acélhasábok lyukaiba kellett többméteres kvarcszálakat dugdosni. Debreceni kutatók készítették elő és szerelik fel a műonkamrák pozicionáló rendszerét, amihez az L3 LEP-kísérletben szerzett tapasztalataikat hasznosították: a hatméteres kamrák szálainak helyzetét, a részecskepályák megfelelő rekonstrukciója végett, tizedmilliméteres pontossággal kell meghatározni.

A másik óriási LHC-detektor, az ATLAS egészen más megoldásokat tartalmaz. A legnagyobb különbség a mágnesek között van: amíg a CMS a hagyományos szolenoid köré épül, az ATLAS belső szolenoidját óriási toroidmágnesek veszik körül, lényeges vasárnyékolás nélkül. Emiatt az ATLAS térfogata nyolcszor akkora, mint a CMS-é, de a CMS kétszer nehezebb, a teljes súlya 12 800 tonna. Az ATLAS-t a föld alatt szerelik össze, amíg a CMS-t a felszínen; a tesztek után viszont kétezertonnás darabokban fogják a száz méter mély üregbe engedni. Ez utóbbi művelet sem egyszerű: légpámán csúsztatják az üreg vasbeton fedelére, és ott emeli meg a daru, hogy a fedelet szétnyitva leereszthessék, majd megint légpámán tolják a helyére.

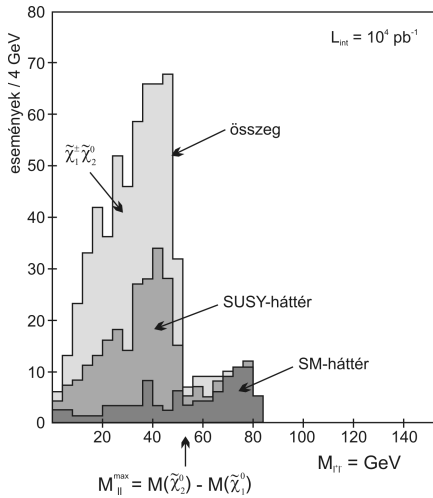
### 3. Részecskekeresés

Az LHC 40 MHz-es adatfolyama természetesen feldolgozhatatlan, több egymást követő számítógépes szűrőrendszer redukálja 100 kHz-re, majd 100 Hz-re, amelyet a petabájtos tároló már képes kezelni. Az adattárolást és -feldolgozást a CERN az LHC Computing Grid (LCG) programmal oldja meg, amelynek fejlesztésében magyar részről a Magyar Grid Kompetencia Központ öt intézménye, a BME, ELTE, NIIFI, RMKI és SZTAKI vesz részt. Az LCG központja a CERN, az alapvető adattárolás egy tucat elsődleges LCG-központban (Tier-1) történik majd, mi a karlsruheihez tartozunk, a másodlagos központokban (Tier-2) folyik majd az adatfeldolgozás és szimuláció, erre Magyarországon az RMKI LCG-központja szolgál majd, amely pillanatnyilag száz processzorral és 3,5 terabájtnyi tárolókapacitással rendelkezik. Jelenleg az LHC-kísérletek szimulációját, valamint biológiai, szilárdtestfizikai és gravitációs számításokat végeznek rajta.

A protonütközések túlnyomó része egyszerű szóródás lesz, az érdekes eseményekben tehát a nyalábra merőleges aktivitást kell keresnünk. Mivel a feltételezett szuperszimmetria kvantumszáma megmarad, ha egy proton-proton ütközésben keletkezik szuperszimmetrikus részecske-antirészecske pár, azok bomlási láncá végén megjelenő legkönnyebb semleges SUSY-részecske (LSP) stabil, nincs hova bomlania, és elszáll. Ha összegezzük a nyalábra merőlegesen észlelt részecskék impulzusát, zérushoz közeli értéket kell kapnunk, SUSY-keletkezés azonban nagy hiányzó transzverzális impulzust jelent, ez a SUSY-keresés elsődleges válogatási elve. A SUSY-részecskék azonosítása már sokkal bonyolultabb a rengeteg különböző modell miatt. Elméleti kollégáinkkal együttműködésben ezért kiválasztottunk jellegzetes

<sup>3</sup> Rengeteg érdekes adat, fénykép, ábra és videofilm látható a CMS-együttműködés nagyközönségnek szóló honlapján: <http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html/>

<sup>4</sup>Az RMKI LCG-központ honlapja: <http://www.grid.kfki.hu/?lcg&lcgwelcome>



2. ábra • Szimulált SUSY-keresés a CMS-nél. A legkönnyebb SUSY-részecskét (LSP) nem észleljük, ezért amikor a második legkönnyebb semleges *neutralinó* leptonpárra és az LSP-re bomlik, a két lepton invariáns tömege éles levágást mutat a két SUSY-részecske tömegkülönbségénél.

paraméteregyütteseket, és az analíziseket azokra igyekszünk érzékenyíteni.

Az elszálló LSP nemcsak hiányzó impulzust jelent, hanem hiányzó tömeget is. A bomló részecske tömegét a bomlástermékek impulzusaiból rekonstruált invariáns tömeg adja; ha valamelyik bomlástermék eltűnik, az szakadást jelent a tömegspektrumban. A 2. ábra ilyen jellegzetes tömeglevágást mutat egy szimulált SUSY-eseményre, ahol a két töltött lepton impulzusából számított

invariáns tömeg hirtelen levág a két semleges SUSY-részecske tömegkülönbségének megfelelő értékénél.

A CMS-együttműködésnek az LHC indulásakor készen kell állnia a kísérleti adatok feldolgozására, az analízis algoritmusait addigra részletesen ki kell dolgozni. 2006 őszére el kell készülnünk a részletes fizikai tervvel (Physics Technical Design Report), amely két kötetben összefoglalja az alapvető fizikai feladatok megoldását. Csoportunk a bécsi Nagyenergiájú Fizikai Intézzel együttműködésben a szuperszimmetrikus részecskék keresésébe kapcsolódott be, és első lépésként a top kvark SUSY-partnerének (sztóp) keresésére dolgozunk ki algoritmust. Bizonyos MSSM-paraméterek mellett nagyszámú gluinó keletkezése várható, amelyek nagy valószínűséggel bomlanak top-kvarkra és sztopra. A top-kvark azonosításával meg tudjuk jelölni a sztopot, amely leptonra és kvarkra bomlik hiányzó impulzus mellett, az energiahiány megkövetelése pedig segít a protonütöközésnél nagy számban keletkező top-antitop kvarkpárok háttere ellen. A számításokat az LCG-rendszeren kell végeznünk, mert a szimulációs adatbázisokat a legkülönbözőbb helyeken, a CERN-en kívül amerikai, olasz, spanyol, francia és német számítóközpontokban tárolják: a Grid-szoftver megkeresi a specifikált adatbázis lelőhelyét, a programot ott futtatja, és az eredményt visszajuttatja a feladónak.

Kulcsszavak: *szuperszimmetria (SUSY), Standard Modell, Higgs-bozon, CERN*

# SZÉN NANOCSÖVEK OPTIKAI SPEKTROSKÓPIÁJA

Kamarás Katalin

a fizikai tudomány doktora

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

kamaras@szfki.hu

A szén nanocsövek az utóbbi években egyre nagyobb szerephez jutnak alapkutatói és potenciális alkalmazási szempontból egyaránt. A nanocsövek előállításáról és szerkezetéről nemrégiben olvashattunk a *Magyar Tudomány* hasábjain a téma neves magyar művelőitől (Kónya, 2003; Bíró, 2003), így itt elsősorban – a Lézerfizikai és Spektroszkópiai Bizottság profiljának megfelelően – a spektroszkópiára, ezen belül is az egyfalú nanocsövek spektroszkópiájára szorítkozom.

Minden új anyagcsalád esetében az első lépés – a megfelelő tisztaságban való előállítást követően – az atomi, elektron- és rezgési szerkezet meghatározása. Sajnos a szén nanocsövek esetében ez már csak azert sem egyszerű, mert igen sokféle nanocső létezik. Ezért a problémát ketté kell bontanunk az egyedi nanocsövek és a makroszkopikus minták (ún. hálózatok) kérdésére.

A szén nanocsöveket egyetlen grafitszerű szénréteg, az ún. grafénsík felcsavarásával létrejött struktúrákként képzelhetjük el. A felcsavarás természetesen hatással van az elektronszerkezetre is: a grafit delokalizált p-pályái, amelyek a síkok alatt és fölött, a síkkal párhuzamosan helyezkednek el, ilyen módon két hengerpalástot alkotnak a csővel párhuzamosan. Ez az elektronszerkezet adja a nanocsövek egydimenziós jellegét, a cső tengelyének irányában könnyen mozgó p-elektronok tekinthetők vezetési elektronoknak, a vázat képező s-kötéseket pedig a törzs-

elektronok analógjai alkotják. A vezetési elektronokra az egydimenziós sávmodell alkalmazható, amelynek egyik következménye az állapotsűrűségben éles maximumok, az ún. Van Hove-szingularitások megjelenése. Az ezek közötti átmenetek detektálhatók a közeli infravörös és látható tartományban optikai abszorpció és lumineszcencia formájában. A felcsavarás jellege szerint a csövek fémes vagy félvezető jellegűek lehetnek, és a félvezetők optikai elnyelési frekvenciáit is a geometria határozza meg. Ezért nagy jelentőségűek azok az önmagukban is igen kifinomult módszerek, amelyek egyedi nanocsövek elektronszerkezetének felderítésére irányultak.

Egyedi csövek alagútspektroszkópiával tanulmányozhatók (Wildöer, 1998; Ouyang, 2001). Az alagútmikroszkópiával való kombinálás azt is lehetővé teszi, hogy a geometriát és a gerjesztéseket egyazon mintán mérjék, így direkt bemeneti adatokat biztosítsanak a sáv szerkezet-számolásokhoz. A módszert tovább kombinálták Raman-spektroszkópiával, ami egyetlen cső rezgési állapotairól adott felvilágosítást (Jorio, 2001).

A legtöbb makroszkopikus nanocsőminta – ún. hálózat – szorosan összefonódott kötegekből áll, amelyek papírszerű lapokká állnak össze (buckypaper). Ezekben a szilárd rendszereken a lumineszcencia megfigyelése nem lehetséges, mivel a kötegben levő szomszédok valamelyike gyors lebomlási

csatomát biztosít. Méreteik miatt viszont a csövek hagyományos oldatba nem vihetők, csak szuszpenzió készíthető belőlük, amelyben a kötegek többé-kevésbé együtt maradnak. A Rice University kutatóinak nevéhez fűződik az áttörés: felületaktív anyag hozzáadásával a csöveket micellákba vitték, majd ultracentrifugálással elválasztották a szuszpenziókat az áttörést, amely micellánként csak egy csövet tartalmazott (Bachilo, 2002). Az így preparált minták abszorpciós és lumineszcencia-spektrumában már felbonthatóak voltak az egyes nanocsövekre jellemző csúcsok, így hosszú, alapos munkával lehetővé vált az összetétel meghatározása is.

A szén nanocsövek rezgéseinek legfontosabb vizsgálati módszere kezdetektől fogva a Raman-spektroszkópia volt (Jorio, 2003). Mivel egy hálózaton belül sokféle cső fordul elő, az elektrongerjesztések energiája pedig az átmérettől függ, a legtöbb gerjesztő lézervonalhoz található olyan egyedi cső a mintában, amelynek valamelyik átmenete megegyezik a lézer frekvenciájával. A Raman-spektrum tehát szinte minden esetben rezonanciaerősített, és abban a gerjesztő lézer által kiválasztott néhány fajta cső dominál, a többiek intenzitása elhanyagolható. Ezért egy nanocsőhálózat teljes felderítéséhez több, lehetőleg hangolható lézerforrással rendelkező, igen érzékeny Raman-berendezés szükséges. Tisztaságvizsgálatra és ismert minták összehasonlítására azonban megfelel egy egyszerűbb Raman-mikroszkóp is, amilyennel például az SZFKI-ban rendelkezünk.

Bármennyire is látványos eredmények érhetők el egyedi nanocsövek vizsgálatával, sok alkalmazás szempontjából fontos, hogy olyan optikai állandókat tudjunk megmérni makroszkopikus nanocsőhálózatokon, mint a törésmutató vagy az optikai abszorpció. Ehhez megfelelő mintákra van szükségünk, lehetőleg olyanokra, amiken könnyű optikai transzmissziót mérni a teljes spektrális tartományban. Ilyen nagyon vékony önhordó

filmeket nemrégiben sikerült előállítani (Wu, 2004) és a spektrumot a távoli infravöröstől az ultrabolyáig meghatározni (Borondics, 2004). Ezeknek az anyagoknak az érdekességük, hogy bár nagy az egyenáramú vezetőképességük, mégis az infravörös/közeleli infravörös tartományban akár 80 %-os áteresztést is el lehet érni a legjobb minőségű vékonyrétegeken. E tulajdonságuk átlátszó vezető elektródként való alkalmazásuk lehetőségét vetíti előre.

Érdekes módon, infravörös-aktív rezgési módusok nem jelentkeznek tiszta nanocsövekben (a megfelelő oszcillátorerőségek valószínűleg túl kicsik), ezért az infravörös spektroszkópiával foglalkozók sokkal később kezdtek a téma iránt érdeklődni, mint a Raman-közösség. Az éles rezgési csúcsok hiányáért kárpótol az a lehetőség, hogy a fém nanocsövek szabad töltéshordozóinak abszorpciója a távoli infravörös/infravörös tartományba esik, a félvezető csövek pedig itt semmiféle választ nem adnak. Ezzel szelektíven vizsgálhatók a fém nanocsövek, hálózatokon belül is.

A nanocsövek anizotrópiája optikai módszerekkel, polarizált fényben világra meghatározható. Ennek eddig az volt az akadálya, hogy a nanocsőhálózatok leginkább egy gombolyaghoz hasonlítanak, és általában nem rendeződnek egy irányba. Nagy mágneses térrel azonban már sikerült többé-kevésbé rendezett kötegeket előállítani (Walters, 2001), és ezeken valóban nagyfokú anizotrópia figyelhető meg (Kamarás, 2006).

Többfalú nanocsövek spektrumai ma még nehezen értelmezhetők. Kivételt képeznek a duplafalú nanocsövek, ahol a koncentrikus csövek száma pontosan kettő. Ezekben a belső és külső cső az átmérők alapján jól megkülönböztethető, és külön előny, hogy a belső csövet a külső árnyékolja a környezeti hatásoktól, így az sokkal tisztábbnak tekinthető, mint egy átlagos, kötegbe ágyazott szén nanocső (Pfeiffer, 2003).

Duplafalú nanocsövekben meg tudták valósítani a szelektív izotóphelyettesítést is (Simon, 2005), ahol csak a belső csövek tartalmaznak  $^{13}\text{C}$  izotópot.

Magyar kutatók kezdetben elsősorban nemzetközi együttműködésben kapcsolódtak be a nanocsövek spektroszkópiai vizsgálatába, mind elméleti (Zólyomi, 2003), mind kísérleti (Kamarás, 2003; Simon, 2005) téren. Mostanra örömmel mondhatjuk, kialakult egy kritikus tömeg itthoni kutatócsoportokból, és – nem utolsósorban egy EU-műszerpályázat segítségével – megvalósulni látszik a műszeres háttér is egy távoli infravörös spektrométer és alagútmikroszkópok formájában. Így megvan a megfelelő infrastruktúra és szellemi kapacitás is az eredményes

hazai kutatásokhoz. Nemzetközi kapcsolatainknak köszönhetően a lehető legjobb nanocső-alapanyagokhoz tudunk hozzáférni, a hozzáadott értéket pedig infravörös (elsősorban távoli infravörös) és Raman-spektroszkópia, kémiai funkcionálás és korszerű módszerekkel végzett elektronszerkezeti és dinamikai számítások jelentik. Öröndetes, hogy ebben a munkában sok fiatal kutató is részt vesz, de továbbra is nagy szükség volna lelkes, érdeklődő hallgatókra és doktoranduszokra e dinamikusan fejlődő területen.

*Kulcsszavak: szén nanocső, optikai spektroszkópia, lumineszcencia, alagútmikroszkópia, infravörös spektroszkópia, Raman-spektroszkópia*

#### IRODALOM

- Bachilo, Sergei M. – Strano, M. S. – Kittrell, C. – Hauge, R. H. – Smalley, R. E. – Weisman, B. R. (2002): Structure-Assigned Optical Spectra of Single-Wall Carbon Nanotubes. *Science*. **298**, 2361–2366.
- Bíró László Péter (2003): Újszerű szén nanocső architektúrák. *Magyar Tudomány*. **9**, 1122–1129.
- Borondics Ferenc – Kamarás K. – Chen, Z. – Rinzler, A. G. – Nikolou, M. – Tanner, D. B. (2004): Wide Range Optical Studies on Transparent SWNT Films. *AIP Conference Proceedings*. **723**, 137–140.
- Jorio, Ado – Souza Filho, A. G. – Dresselhaus, G. – Dresselhaus, M. S. – Saito, R. – Hafner, J. H. – Lieber, C. M. – Matinaga, F. M. – Dantas, M. S. S. – Pimenta, M. A. (2001): Joint Density of Electronic States for One Isolated Single-Wall Carbon Nanotube Studied by Resonant Raman Scattering. *Physical Review B*. **63**, 245416-1–4.
- Jorio, Ado – Pimenta, M. A. – Souza Filho, A. G. – Saito, R. – Dresselhaus, G. – Dresselhaus, M. S. (2003): Characterizing Carbon Nanotube Samples with Resonance Raman Scattering. *New Journal of Physics*. **5**, 139.1–17.
- Kamarás Katalin – Itkis, M. E. – Hu, H. – Zhao, B. – Haddon, R. C. (2003): Covalent Bond Formation to a Carbon Nanotube Metal. *Science*. **301**, 1501.
- Kamarás Katalin – Thirunavukkuarasu, K. – Kuntscher, C. A. – Dressel, M. – Simon, F. – Kuzmany, H. – Walters, D. A. – Moss, D. A. (2006): Far- and Mid-infrared Anisotropy of Magnetically Aligned Single-Wall Carbon Nanotubes Studied with Synchrotron Radiation. *Infrared Physics and Technology*, megjelenés alatt
- Kónya Zoltán – B. Nagy J. – Kiricsi I. (2003): Szén nanocsövek előállítása és alkalmazásai. *Magyar Tudomány*. **9**, 1114–1121.
- Ouyang, Min – Huang, J.-L. – Cheung, C. L. – Lieber, C. M. (2001): Energy Gaps in “Metallic” Single-Walled Carbon Nanotubes. *Science*. **292**, 702–705.
- Pfeiffer, Rudolf – Kuzmany, H. – Kramberger, Ch. – Schaman, Ch. – Pichler, T. – Kataura, H. – Achiba, Y. – Kürti J. – Zólyomi V. (2003): Unusual High Degree of Unperturbed Environment in the Interior of Single-Wall Carbon Nanotubes. *Physical Review Letters*. **90**, 225501-1–4.
- Simon Ferenc – Kramberger, Ch. – Pfeiffer, R. – Kuzmany, H. – Zólyomi V. – Kürti J. – Singer, P. M. – Alloul, H. (2005): Isotope Engineering of Carbon Nanotube Systems. *Physical Review Letters*. **95**, 017401-1–4.
- Wildöer, Jeroen W. G. – Venema, L. C. – Rinzler, A. G. – Smalley, R. E. – Dekker, C. (1998): Electronic Structure of Atomically Resolved Carbon Nanotubes. *Nature*. **391**, 59–62.
- Walters, Deron A. – Casavant, M. J. – Qin, X. C. – Huffman, C. B. – Boul, P. J. – Ericson, L. M. – Haroz, E. H. – O’Connell, M. J. – Smith, K. – Colbert, D. T. and Smalley, R. E. (2001): In-plane Aligned Membranes of Carbon Nanotubes. *Chemical Physics Letters*. **338**, 14–20.
- Wu, Zhuangchun – Chen, Z. – Du, X. – Logan, J. M. – Sippel, J. – Nikolou, M. – Kamarás, K. – Reynolds, J. R. – Tanner, D. B. – Hebard, A. F. – Rinzler, A. G. (2004): Transparent, Conductive Carbon Nanotube Films. *Science*. **305**, 1273–1276.
- Zólyomi Viktor – Kürti J. – Grüneis, A. – Kuzmany, H. (2003): Origin of the Fine Structure of the Raman D Band in Single-Wall Carbon Nanotubes. *Physical Review Letters*. **90**, 157401-1–4.

# KOMPLEX HÁLÓZATOK A TERMÉSZETBEN ÉS A TÁRSADALOMBAN

Kertész János

az MTA levelező tagja, BME Fizikai Intézet – kertesz@phy.bme.hu

Vicsek Tamás

az MTA rendes tagja, ELTE Fizikai Intézet – vicsek@angel.elte.hu

## 1. Bevezetés

Ma már közhely, hogy körbe vagyunk véve hálózatokkal. Egyfelől tudatosan megéljük, hogy az internetet mint hálózatot használjuk, ugyanakkor talán sokan nem is tudják, hogy azokat a bonyolult biológiai, közgazdasági és egyéb rendszereket, amelyekbe ágyazva élünk, leginkább úgy lehet megérteni, ha hálózatoknak tekintjük őket.

Sokféleképpen lehet egy elemekből (pontokból, csúcsokból) és az azokat összekötő kapcsolatokból (élekből) álló hálózatot (gráfot) jellemezni. Ha az elemek száma nagy, akkor kézenfekvő, hogy a sok kölcsönható részecskéből álló rendszerek tulajdonságainak megértése céljából kifejlesztett statisztikus fizikai módszereket használjuk a hálózatok megismerésére.

Magyarországon a hálózatok modern elméletéhez kapcsolódó témákban széleskörű és sikeres kutatás folyik. Ebben a cikkben – egy bevezetést követően – két kiragadott területre: a súlyozott élekkel és a csoportosulásokkal rendelkező hálózatokra vonatkozó eredményeket tekintjük át.

## 2. A természetben, a társadalomban előforduló hálózatok és univerzális tulajdonságaik

A „komplex rendszer” fogalmát a fizikában vezetőik be olyan rendszerekre, ahol az alko-

tóelemek nagy száma és a közöttük lévő kölcsönhatás révén a rendszer viselkedése az egyes egységeiktől lényegesen eltérő sajátosságokat mutat. Egyszerűen fogalmazva: az egész több mint részeinek összege. A fizikából számos példát lehet idézni komplex rendszerekre a mágnesektől az üvegeken keresztül a szemcsés anyagokig. A fogalom nyilvánvalóan túlmutat a fizikán: a sejt, az agy, a gazdaság, a társadalom csak néhány további példa.

A komplex rendszerek esetében a kölcsönhatások részleteiről gyakran beható ismeretekkel rendelkezünk, de ez nem vezet az egész igazi megértéséhez. Mi történik, ha egy nagy ugrással teljesen figyelmen kívül hagyjuk a kölcsönhatások természetét, és csak az általuk generált topológiával, a komplex rendszer vázával foglalkozunk?

Nevezzük a komplex rendszer alkotó-elemeit csúcsoknak. Ha két ilyen alkotóelem kölcsönhat, akkor azt mondjuk, hogy a csúcsok között van él; az egy csúcsához tartozó élék száma a fokszám. (Az élék lehetnek irányítottak is.) Az így nyert objektumot a komplex rendszerhez tartozó hálózatnak tekintjük. A matematikában a gráfelmélet foglalkozik ilyen objektumokkal, és óriási ismeretanyag halmozódott fel ezekről az elmúlt 250 év során. A gráfelméletet sikerrel alkalmazták például a villamosmérnöki, a kémiai tudományokban vagy a szociológiában. Az



<i>Jelenség</i>	<i>Csúcsok</i>	<i>Élek</i>
1. sejt metabolizmus	molekulák	kémiai reakciók
2. tudományos együttműködés	tudósok	közös cikkek
3. WWW	honlapok	URL mutatók
4. légi közlekedés	repülőterek	repülőjárat
5. gazdaság	vállalatok	kereskedés
6. nyelv	szavak	hasonló jelentés
7. társadalom	emberek	ismeretség

1. táblázat • Példák hálózatokra

1990-es évek végén bekövetkezett látványos fejlődés elsősorban annak köszönhető, hogy új eszközöket és módszereket alkalmaztak a hálózatok tanulmányozására, erősen támaszkodva a statisztikus fizikára (Albert – Barabási, 2002; Dorogovtsev – Mendes, 2002; Newman, 2003).

Az 1. táblázat különböző kölcsönhatásokra épülő hálózatokat tartalmaz. Van közöttük irányított (például a 3.) és irányítatlan (például a 2.), ember által alkotott és tervezett (például 4.), természeti fejlődés eredménye (1.), vagy emberi közreműködéssel, de spontán fejlődéssel keletkezett (például 3., 5.).

A hálózatok empirikus tanulmányozásának a lehetőségét óriási mértékben növeli, hogy a komputerizációnak köszönhetően az elérhető adatok mennyisége hihetetlen módon megnőtt. Néhány példa: A hollywoodi filmszínészek adatbankja 450 ezernél több személyt tartalmaz, valamennyi filmjükkel együtt. A *Humán Genom Projekt* egy harmincezer génről és hárommilliónál több bázispár szekvenciájáról hozott létre adatbankot. A WWW mérete meghaladja a hatmilliárd honlapot. A tőzsdén valamennyi tranzakciót feljegyzik egy állandóan növekvő adathalmazt alkotva, amelyből gazdasági hálózatok térképezhetők fel. Az ilyen hatalmas adatmennyiségek tanulmányozása fontos felfedezésekhez vezetett. A fő kérdés, hogy van-e remény arra, hogy ennyire különböző eredetű és funkciójú hálózatok közös vonásokat mutassanak.

*Kicsi a világ* – mondjuk, ha váratlanul kiderül, hogy könnyű kapcsolatot találni egy ismeretlen személyhez ismeretségi láncan keresztül. Már Karinthy Frigyes rámutatott, a 60-as évektől pedig szociológusok igazolták, hogy a társadalom szerkezete ilyen: Az alkotóelemek nagy száma ellenére az átlagos lépésszám („távolság”) a hálózaton meglepően kicsiny. A „kis világ” tulajdonság számos hálózat sajátossága, a kutatók társszerzői hálózatától a WWW-n keresztül a sejtekig.<sup>1</sup>

Komplex hálózatok egy másik érdekes, szintén a szociológiából ismert tulajdonsága az, amit röviden a „barátok barátai könnyen barátkoznak” kifejezéssel lehet érzékeltetni. Más szóval, a hálózatokban a háromszögek gyakorisága nagy (például egy véletlen hálózathoz képest). További, igen széles körben jelentkezett tulajdonsága a komplex hálózatoknak az ún. skálamentesség. Ez azt jelenti, hogy a csúcsok fokszámának nincs egy jellemző értéke, aminél sokkal kisebb illetve sokkal nagyobb fokszámú csúcsot csak elenyésző hányadban lehet találni. Matematikailag ez abban nyilvánul meg, hogy a fokszámeloszlás hatványfüggvény jellegű. A skálamentesség a komplex rendszerek fizikai elméletében központi szerepet játszik. A komplex rendszerekre jellemző, hogy hierarchikus szerveződésűek, azaz

<sup>1</sup> Matematikailag egy összefüggő hálózat „kis világ”, ha a két pont közötti legrövidebb távolságok átlaga nem növekszik logaritmikusan gyorsabban a rendszer méretével.

egymásba ágyazott egységeket tartalmaznak. Ez a tulajdonság az emberi társadalomra és az egyes emberekre is igaz. Munkahelyünkön az egyes szinteknek megfelelően, például csoportok, osztályok, főosztályok, leányvállalatok vannak. Életünket szerveink (májunk, agyunk, lépünk stb.) összehangolt működése tartja fent. Ezek a szervek sejtekből állnak, amelyekben sejtsejtszervecskék találhatók. A legalsó, már konkrét biológiai jelentéssel/funkciókkal rendelkező építőelem a több mint százezerféle fehérje.

A nagy, véletlen hálózatok leírásában a 90-es évek végéig az Erdős–Rényi-modell volt az uralkodó. A fenti sajátosságok közül azonban ez a teljesen véletlen kapcsolatokat feltételező modell sem a nagy csomósodási tulajdonságot, sem a skálamentességet nem adja vissza. 1998-ban Duncan Watts és Steven Strogatz egyszerű modellt vezettek be: egy nagy csomósodási tulajdonságú (sok háromszöget tartalmazó), szabályos hálózatból (rácsból) indultak ki, és ebbe viszonylag kis számú, véletlen élt helyeztek el. Az így létrejött hálózat nagy csomósodású kis világ. Barabási Albert-Lászlónak kulcsszerepe volt a skálamentesség általános jellegének felismerésében. Az általa és Albert Réka által kidolgozott, kivétező csatlakozáson alapuló növekedési hálózatmodell a skálamentes kis világ modellek paradigmájává vált.

A továbbiakban az adatok elemzésének néhány új módszerét ismertetjük.

### 3. Súlyozott hálózatok és elemzésük

A komplex rendszerek hálózati alapú tanulmányozása holisztikus megközelítés, szemben a kölcsönhatások tulajdonságaira összpontosító redukcionista leírással. A valódi megértéshez a két szélsőséges álláspont egyesítésére van szükség. Az első lépés a hálózati irányból, ha a kölcsönhatásokat nem tekintjük egyformának, és erősségüket valamilyen skálán jellemezzük, vagyis súlyokat rendelünk a kölcsönhatásokat jelképező élekhez.

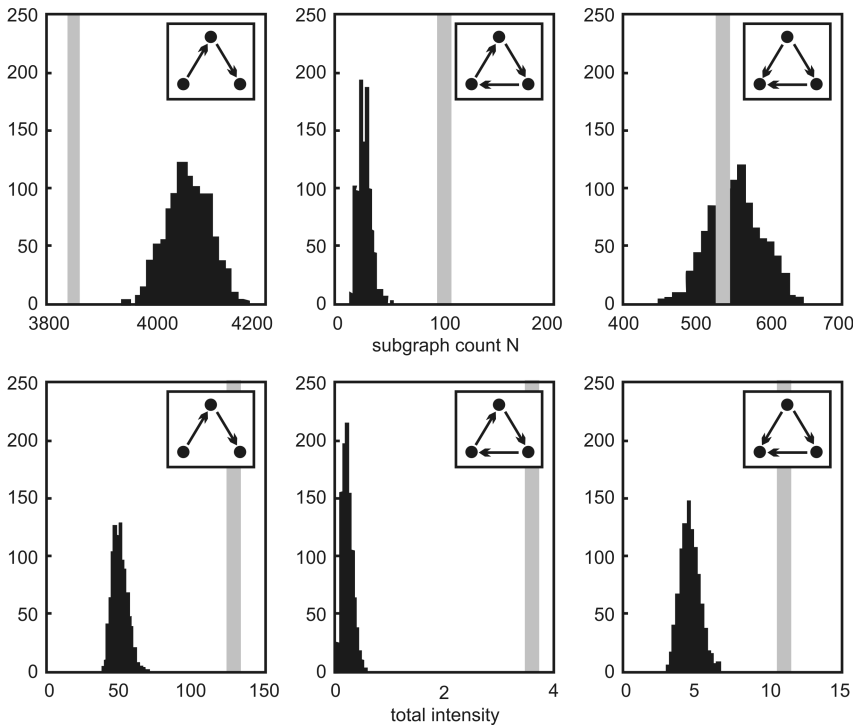
Természetes súlyként adódik az időegységre vetített forgalom például a közlekedési hálózatoknál, az interneten vagy egy telefonhálózatban. Kémiai reakciókban a szereplő anyagáramok mértéke használható fel súlyok formálására (lásd például Almaas et al., 2004). A hálózatokat gyakran valamilyen komplex rendszerben lejátszódó folyamatok korrelációs függvényeinek segítségével nyerjük – ilyenkor nyilván a korreláció mértéke azonosítható az élhez tartozó súllyal.

A súlyozatlan hálózatok jellemzéséhez célszerű volt az egyes motívumok statisztikáját tanulmányozni. Motívum ebben a vonatkozásban a topológiaiilag azonos részgráfok összessége.<sup>2</sup> Például a korábban már említett háromszögek ilyen motívumnak tekinthetők. Ha egy motívum szignifikánsan gyakori egy hálózatban (például a véletlen hálózathoz képest), akkor felmerül, hogy funkcionálisan fontos lehet (Milo et al., 2002).

Hogyan lehet ezt a megközelítést a súlyozott hálózatokra kiterjeszteni (Onnella et al., 2005)? Be kell vezetni egy mérőszámot, ami a részgráf súlyát jellemzi. Erre (pozitív súlyok esetében) a részgráfban szereplő élek súlyainak mértani közepe kínálkozik, amit a részgráf intenzitásának nevezünk. Jobb a mértani közeget választani a számtani helyett, hiszen az előbbi automatikusan szolgáltatja a 0 intenzitást, ha valamelyik él hiányzik a részgráfból.

Az 1. ábra bemutatja, hogy a súlyok figyelembe vétele hogyan változtathatja meg akár az egyes motívumokra vonatkozó következtetéseket is. A vizsgált irányított hálózat az *Escheria coli* baktérium metabolizmusa alapján készült, ahol a kémiai reakciók során fellépő eredő fluxus segítségével lehet a súlyokat meghatározni. Az ábra három egyszerű motívum statisztikáját mutatja be: a függőleges vonalak jelentik a mért értékeket. Az összehasonlításként feltüntetett el-

<sup>2</sup> Részgráf a hálózat olyan része, amely maga is egy hálózat (gráf).



1. ábra • Súlyozatlan (felső sor) és súlyozott motívumok statisztikája az E. coli baktérium metabolikus hálózatában.

oszlások a viszonyítási rendszernek felelnek meg, olyan véletlen hálózatnak, amelynek a fokszámeloszlása megfelel a megfigyeltnek, és amelyen az empirikus súlyoknak véletlen permutációi valósultak meg. A tanulság, hogy bizonyos ritka motívumok igen nagy intenzitással lehetnek képviselve, ami a funkcionalitásra vonatkozó következtetéseket befolyásolja.

A súlyozott hálózatok elemzésének további, hatékony és egyszerű módszere a „küszöbölés”. Egyik megvalósítási lehetősége, hogy a hálózatban figyelmen kívül hagyjuk az egy bizonyos küszöbérték alatti súlyral rendelkező éleket. A küszöbérték mozgatásával egy képsorozat vagy mozgókép keletkezik, amelyik az elszigetelt csúcsoktól elindulva, az élek fokozatos, erősség szerinti bekapcsolásával végül a teljes hálózatig jut el. Ezzel a módszerrel

elemelve a New York-i tőzsde legnagyobb vállalatai árfolyamváltozásainak korrelációs függvénye alapján létrehozott hálózatról (Onnela et al., 2004) kiderül, hogy bizonyos gazdasági ágazatokon belül (például ilyen az energiaszektor) nagyon erős a korreláció, míg más szektorok (például a pénzügy) elemeire ágazatokon átívelő szoros kapcsolatok jellemzőek. Az ilyen és hasonló módszerekkel szerzett információk egyrészt hozzájárulnak a piac alaposabb megértéséhez, de felhasználhatók például a portfóliók optimalizálásánál is.

A szociális hálózatok vizsgálatánál régóta hangsúlyozzák a súlyok fontosságát, de ezek meghatározása nem könnyű feladat. A modern telekommunikáció korában új, a korábbinál jóval objektívebb módszerek alkalmazására nyílik lehetőség. Így például

a telefontársaságok minden beszélgetésről feljegyzik, hogy ki hívott kit, mikor, és mennyi ideig tartott a beszélgetés. Kézenfekvő a kapcsolatok intenzitását az egymással folytatott beszélgetésekre fordított idővel mérni. Egy ilyen hatalmas, több millió csomópontot tartalmazó rendszerre alkalmazva a küszöbölés módszerét, érdekes kép tárul elénk (Onnela et al., preprint): ha a legerősebb kapcsolatok behelyezésével kezdjük a hálózat felépítését, majd fokozatosan csökkentjük a küszöböt, azt tapasztaljuk, hogy először intenzív kapcsolatban lévő egyedekből álló, de egymástól elszigetelt közösségek azonosíthatók. Csak a viszonylag gyengébb kapcsolatokat jelképező élek megjelenésével alakul ki az egész rendszerre (társadalomra) kiterjedő hálózat. Ily módon igazolni lehet Mark Granovetter 70-es években felállított hipotézisét a gyenge kötések fontosságáról (Granovetter, 1973): bizonyos értelemben ezek tartják össze, stabilizálják a társadalmat.

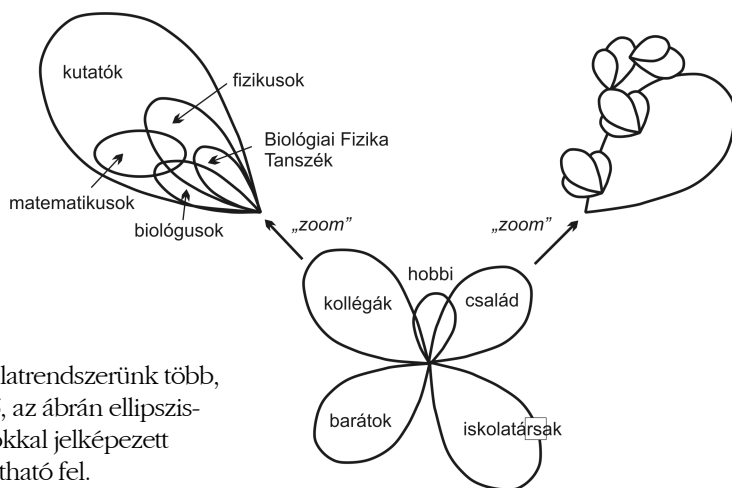
#### 4. Csoportosulások/közösségek a hálózatokban

A valós hálózatok rendkívül összetettek, a sok ezer csúc és a sok tízezer él között szinte reménytelen feladatnak tűnik az eligazodás. Vajon egy komplex hálózat (például

génhálózat) is olyan, mint egy „szervezet”? Vannak benne jól meghatározható, különálló egységek hasonló típusú egységekből, vagy a szerveződés kibogozhatatlan?

Vizsgáljuk meg, hogy egy nagy, biológiai vagy szociológiai eredetű hálózat belső szerkezete hogyan jellemezhető a bennük levő sűrűbben összekapcsolt részek (közösségek) feltárása segítségével.

A témakör lényegét legjobban egy konkrét példán lehet bemutatni. A szemléltetéshez alkalmasabb a szociológiai megközelítés (Faust, 2005; Newman, 2004). A gráf pontjai itt az egyének, és akkor van köztük él, ha két egyén valamilyen kapcsolatban van egymással. Tekintsük tehát egy embertársunkat, egy kutatót, aki például biológiai fizikai kutatásokkal foglalkozik. Ennek a személynek a kapcsolatrendszere jól meghatározott csoportokból áll, amelyeken belül a tagok között viszonylag több a kapcsolat, mint a tagoknak a kívüllég felé. Ilyen csoportok vagy másképpen közösségek a család, a barátok, a kollégák, az iskolatársak stb. Ezek a közösségek egyszerre *különállóak, és át is fednek, valamint több szíjjal kötődhetnek* a hálózat fennmaradó részéhez. Átfedés az, hogy volt iskolatárs lehet kolléga, sőt barát is, de nyilván vannak további, más közös-



2. ábra • Kapcsolatrendszerünk több, egymással átfedő, az ábrán ellipsziszszerű tartományokkal jelképezett részhálózatra osztható fel.

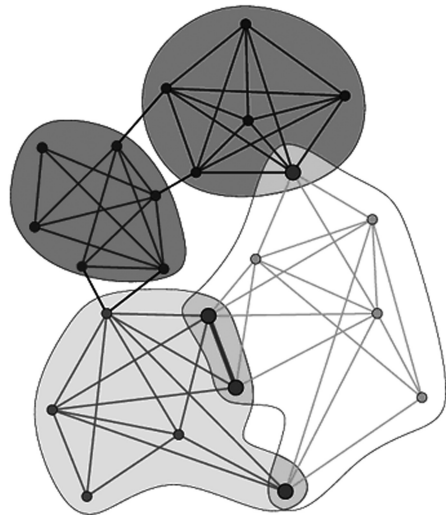
ségekkel is kapcsolatai. A szociális kapcsolati háló tehát rendkívül összetett, egymással átfedő, izolált vagy éppen egymásba ágyazott csoportosulások együttes halmaza, és az egész társadalom működésének megértéséhez ezt a komplex hálózatot is át kell tudnunk tekinteni. Ezt próbálja szemléltetni a 2. ábra.

Azt az igényt, hogy keressük meg egy gráf sűrűbben összekötött részeit, sokkal egyszerűbb megfogalmazni, mint ténylegesen teljesíteni. Már maga a *közösség fogalma sem egyértelműen definiált*, hiszen a „sűrűbb összekötöttség” kritériuma többféleképpen is teljesülhet.

Ha egy adott hálózaton belül van  $k$  darab olyan pontunk, amelyek egymással páronként mind össze vannak kötve, akkor ez a pontthalmaz egy  $k$ -klikket képez. Két  $k$ -klikk pedig akkor szomszédos, ha van egy közös  $k-1$  pontot tartalmazó alhalmazuk (amely szintén klikk). Definíció: *két elem akkor tartozik ugyanahhoz a közösséghez, ha össze lehet kötni őket szomszédos  $k$ -klikkeken keresztül*. A  $k$ -klikk közösség tehát az összes olyan egyed halmaza, akik ily módon egymással összeköthetőek. Egy ilyen csoportosulás lehet kicsi, de mérete, ha a gráf elég sűrű, összemérhetővé válhat a teljes hálózatával (ilyenkor mondjuk, hogy az alhálózat „perkolál” [Derényi et al., 2005]).

A fenti típusú közösségek megkeresése egy trükkös algoritmus alapján történik. Van tehát egy módszerünk, most kipróbálhatjuk, milyen eredményeket ad valós adatokra (Palla et al., 2005). A fizikusok működtetnek egy elektronikus cikkarchívumot, amelyen több tízezer cikk adatai megtalálhatóak. Ez az adathalmaz egy gráfnak tekinthető: *a szerzők a pontok, és két szerző akkor van összekapcsolva, ha van közös cikkük*. Ha erre a gráfra lefuttatjuk a közösségedetektáló algoritmusunkat, azt tapasztaljuk, hogy eredményeképpen feltérképeződnek a szerzők tágabb értelemben vett (több országon átívelő) kutatókollektívái.

A legfontosabb alkalmazás azonban valószínűleg a biológiai hálózatok terén várható. Amint arról a fentiekben részletesebben is írtunk, legfontosabb építőköveink, a sejteink működéséről egyelőre a legtöbbet éppen a bennük található fehérjék kölcsönhatási hálózatainak megismerése útján tudhatunk meg. A fehérjék közösségeinek feltérképezésétől sokat várunk: az egyes csoportosulások feltárása segíthet a még nem ismert funkciójú fehérjék szerepének tisztázásában. Többek között megvizsgálható, hogy egy adott  $F$  fehérje milyen közösségek tagja. Ha  $F$  benne van egy olyan csoportosulásban, amelyben a többi fehérje mondjuk épp a sejtosztódás egy bizonyos folyamatában játszik fontos szerepet, akkor sikerült kimutatnunk, hogy  $F$  valószínűleg szintén fontos ennek a sejtosztódási folyamatnak a szempontjából. Amennyiben ezt nem tudtuk erről a fehérjéről valamilyen más forrásból



3. ábra • Az egyes alhálózatokon belül egy teljes algráf, itt például egy  $k=4$  pontból álló klikk, szomszédos  $k-1$  klikkeken (háromszögeken) keresztül végiggördíthető. A fenti négy alhálózat két helyen egy-egy pontban, egy helyen pedig egy élben fed át.

(és ez ma még gyakori), akkor máris kiderül, hogy a módszert használni tudtuk annak a megőrlésére, hogy mi lehet a fehérje szerepe a sejtben. Egy ilyen predikció fontossága gyógyszertervezési, illetve gyógyászati szempontból nyilvánvaló.

### 5. Magyar hálózatkutatók

A hálózatok kutatása igazi multidiszciplináris feladat. A magyar kutatók Erdős Pál és Rényi Alfréd klasszikus munkái óta kulcsszerepet játszanak ezen a területen. Hadd említsük itt meg néhány komplex hálózatokkal foglalkozó kolléga nevét a különböző szakterületekről, a teljesség igénye nélkül, és elnézést kérve a kihagyottaktól: Bollobás Béla (Cambridge, UK és Memphis, USA) a véletlen gráfok matematikai elméletének kiemelkedő művelője. Barabási Albert-László (Notre Dame, USA) egyike volt a komplex hálózatok elméletében bekövetkezett robbanásszerű fejlődés elindítóinak. Tuszányi Gábor (Rényi Intézet) a hálózatok matematikájával, Benczúr András (SZTAKI)

WWW modellezéssel, Csemely Péter (SOTE) (Csemely, 2004) biokémiai hálózatokkal, Vedres Balázs (CEU) szociális hálózatokkal foglalkozik igen sikeresen.

Befejezésül megemlíti, hogy magyar nyelven három ismeretterjesztő könyv is megjelent a komplex hálózatok elméletéről. Mark Buchanan *Nexus* című műve mellett két neves magyar szakember is írt könyvet a szélesebb közönség számára. Csemely Péter *A rejtett hálózatok ereje* című könyve néhány hónappal ezelőtt jött ki. Különösen Barabási Albert-László *Behálózza* című művét ajánljuk az olvasók figyelmébe, mert nemcsak olvasmányos módon ismerteti meg a tudományág új eredményeivel, de ízelítőt ad a nemzetközi szinten kiemelkedően elismert kutatómunka izgalmából is. Nem véletlen, hogy a könyv eredeti, angol változata felkerült a *New York Times* bestsellerlistájára.

Kulcsszavak: *komplex rendszer, gráf, statisztikus fizika, súlyozott hálózatok, skálalhatóság, perkoláció*

### IRODALOM

- Albert Réka – Barabási, Albert-László (2002): Statistical Mechanics of Complex Networks. *Reviews of Modern Physics*. **74**, 47.
- Almaas, Eivind – Kovács B. – Vicsek T. – Oltvai Z. – Barabási A-L. (2004): Global Organization of Metabolic Fluxes in the Bacterium *Escherichia Coli*. *Nature*. **427**, 839–843.
- Csemely Péter (2004): A gyenge kölcsönhatások ereje a stresszfehérjéktől a szociális hálózatokig. *Magyar Tudomány*. **12**, 1318–1324.
- Derényi Imre – Palla G. – Vicsek T. (2005): Clique Percolation in Random Networks. *Physical Review Letters*. **94**, 160202.
- Dorogovtsev, Sergei N. – Mendes, José F. F. (2002): Evolution of Networks. *Advances in Physics*. **51**, 1079.
- Granovetter, Mark (1973): The Strength of Weak Ties. *American Journal of Sociology*. **78**, 1360.
- Faust, Katherine (2005): Using Correspondence Analysis for Joint Displays of Affiliation Networks. In: Carrington, Peter J. – Scott, J. – Wasserman, S. (eds.):

- Models and Methods in Social Network Analysis* Ch. 7. Cambridge University Press, New York
- Newman, Mark E. J. (2003): The Structure and Function of Networks. *SIAM Review* **45**, 167–256.
- Newman, Mark E. J. (2004): Detecting Community Structure in Networks. *European Physical Journal B*. **38**, 321–330.
- Milo, Ron et al. (2002): Network Motifs: Simple Building Blocks of Complex Networks. *Science*. **298**, 824.
- Onnela, Jukka-Pekka – Kaski, K. – Kertész J. (2004): Clustering and Information in Correlation Based Financial Networks. *European Physical Journal B*. **38**, 353.
- Onnela, Jukka-Pekka – Saramäki, J. – Kertész J. – Kaski, K. (2005): Intensity and Coherence of Motifs in Weighted Complex Networks. *Physical Review E*. **71**, 065103(R).
- Onnela, Jukka-Pekka – Hyvönen, J. – Saramäki, J. – Kaski, K. – Kertész J. – Szabó G. Barabási A-L.: Weak Ties in the Structure and Function of Social Networks (preprint)
- Palla Gergely – Derényi L. – Farkas, L. – Vicsek, T. (2005): Uncovering the Overlapping Community Structure of Complex Networks in Nature and Society. *Nature*. **435**, 814.

# REZGÉSEK EGYÜTTHANGZÁSA – A CSILLAGBELSŐ DIAGNOSZTIKÁJA

Kolláth Zoltán

az MTA doktora, MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet  
kollath@konkoly.hu

A csillagok képe a legnagyobb távcsövekben is csak elkenődött folt – a látott szerkezetet a földi légkör örvénylései és az optikai rendszer hibái határozzák meg. Csak néhány esetben sikerült a csillagfelszín szerkezetét megfigyelni a csúcstechnikájú teleszkópokkal, amikor a légköri változásokhoz alkalmazkodó optikai rendszerrel a nagy objektív méretnél megfelelő felbontást érhetek el. Egy csillag kivétel a felszíni felbontás tekintetében: a mi Napunk. Azonban a Nap esetén is csak közvetve nyerhetünk információt a belső szerkezetről. Igaz, a neutrínók a Nap belsejéből könnyedén eljutnak hozzánk – de ugyanilyen könnyedén átröptülnek a detektorainkon is –, ezért a technika mai szintjén a képpalkotásra alkalmatlanok. Központi égitestünk rezgései segítettek abban, hogy csillagunk belső szerkezetét közvetve megfigyeljük.

A Nap esetében kissé olyan helyzetben vagyunk, mintha egy zavaros vízü tó fenekét vizsgálnánk. A fény csak minimális mélységbe hatol be a vízbe, és csak abból a mélységből hoz információt. Ha viszont hullámokat látunk a víz tetején, abból esetleg megtalálhatjuk azokat a részeket, ahol viszonylag sekély a tó – mivel a hullámok viselkedése változik a vízréteg vastagságával. A távoli csillagok esetén a Napéhoz képest is reménytelenebb a helyzetünk, ha a belsejükről szeretnénk megállapítani valamit. Magasból a tó hullámait sem láthatnánk, esetleg egy kis

vibrálást a tóról visszaverődő fényben. A csillagok esetében ez a kis vibrálás lehet az az információ, amely elegendő ahhoz, hogy a csillagbelső „ultrahangképeit” elkészítsük.

Már régóta ismeretes, hogy a csillagok egy része változtatja a fényét – a változások időskálája pár perctől évekig terjed. A változások hatásmechanizmusát csak a 20. század második felében értették meg igazán. A változócsillagok jelentős részénél a fényintenzitásuk ingadozását a belsejükben terjedő akusztikus hullámok okozzák, melyek a csillagok ciklikus tágulásában, összehúzódásában nyilvánulnak meg – ennek megfelelően pulzáló csillagoknak hívjuk őket. A periódusok – mint általában az időtartamok – nagyon pontosan mérhetők, ezért minden egyes megfigyelhető rezgési állapot egy jól definiált számszerű információt jelent. Egy egyszerű inga esetében a periódus mérése alapján nagyon pontosan megmondhatjuk az inga hosszát – feltéve, hogy ismerjük a gravitációs gyorsulást. A csillagok jóval bonyolultabbak, mint egy inga, így egy rezgési periódus önmagában még a csillag méretét sem árulja el. A csillagok fizikájának megismerése szempontjából azok a csillagok bírnak nagyobb jelentőséggel, amelyek nem csak „monofonikusan”, hanem több szólamban rezegnek. Az utóbbi időszak jelentős eredményei mind a megfigyelések, mind az elmélet szempontjából többnyire a többperiódusú pulzáló csillagokhoz kapcsolódnak.

Az egyszerre két különböző periódussal rezgő (kétmódusú) csillagok mutatják az oszcillációk kapcsolódásának legegyszerűbb formáját. Ezen csillagok működésének a megértése ezért is különleges fontosságú – ha ebbe is beletörik a modellezéssel foglalkozó asztrofizikusok bicskájá, akkor a még összetettebb rendszerek értelmezésére kevés remény marad. A pulzáló változócsillagok klasszikusan ismert két főbb csoportja a cefeidák és az RR Lyrae csillagok. Mindkét csoportban megfigyelhetünk kétmódusú csillagokat, melyeket egészen a múlt század legvégéig nem sikerült kielégítően modellezni. A csillagrezgések hidrodinamikai folyamatok, melyekben az elektromágneses sugárzás terjedését is az anyag mozgásához kell kapcsolni. A folyamat modellezése csak numerikusan, számítógépek segítségével oldható meg. A numerikus modellezés története az 1960-as évekig nyúlik vissza, és olyan problémák kísérték végig, mint például a kétmódusú megoldások hiánya a modellekben. Az anyag turbulens mozgásának és a konvekciónak a korábnál pontosabb kezelése segített abban, hogy ezeket a csillagokat numerikus számításainkban reprodukáljuk – 1997-ben kaptuk az első „kétszólamú” cefeida modelleket (Kolláth et al., 1998).

Az összetettebb változást mutató csillagoknál alapvető probléma, hogy a lehetséges rezgési állapotokból melyek valósulnak meg, és azok milyen amplitúdójúak lesznek. A rezgés lehetőségét a csillag stabilitásvizsgálata adja meg. A hepehupás dombtetőn álló labda helyzete instabil lehet, hiszen egy kicsit megpöccintve legurul onnan. Ezt az instabilitást akár ránézésre is megmondhatjuk, viszont azt már sokkal nehezebb eldönteni, hogy merre gurul a labda végül – ez utóbbihoz pontosan ismernünk kell a domborzi viszonyokat. A csillagok esetén is ezt tapasztaljuk: az instabilitás ténye viszonylag egyszerűen megadható: kiszámolható, hogy milyen periódusúak azok a kicsiny rezgések,

amelyek önállóan növekednek. A kezdeti erősödés ellenére azonban előfordulhat, hogy végül a csillag egy másik periódussal kezd rezegni, és a kezdeti ritmus teljesen eltűnik a változásból. Ráadásul a csillag sokkal több különböző periódusú változással szemben is instabil lehet, mint amennyit az állandósult rezgések között megfigyelhetünk. A rezgések kiválasztódásának mechanizmusa még most is megoldatlan kérdés. A kétmódusú pulzáció is erre adott példát. A cefeida és az RR Lyrae csillagok sok modelljére a stabilitásvizsgálat három-négy különböző periódusú mozgás lehetőségét adja meg. Ezek közül általában egy, néha két rezgés marad fenn a valóságban. A kiválasztódás kulcsa a rezgési állapotok nemlineáris kölcsönhatása. Ezt sikerült jól visszaadnunk a turbulens modelljeinkben, garantálva a kétmódusú csillagpulzáció modellezését. A hidrodinamikai számolásokat egyszerűbb modellek illesztésével kibővítve a jelenségkör jól értelmezhetővé vált (Szabó et al., 2004), ezáltal a kétmódusú pulzáció modellezésének kérdése nagyrészt megoldódott.

Kiterjedt fotometriai feltérképezések (fő motivációjuk az Univerzum sötét anyagának keresése volt a gravitációs lencse jelenség segítségével) jóvoltából nagy mennyiségben fedeztek fel változócsillagokat közeli galaxisokban, így a Kis és a Nagy Magellán Felhőben is. A cefeidák és az RR Lyrae csillagok igen fontosak a távolságbecslések szempontjából. A kétmódusú csillagok ismételten kitért szerepet játszanak, mert a két periódus ismerete néhány elméleti és csillagfejlődési adattal kiegészítve elegendő lehet arra, hogy megbecsüljük távolságukat: a pulzációs modellek segítségével kiszámítható az abszolút fényességük is. Az abszolút és a Földről megfigyelt látszó fényesség egybevetésével meghatározható a Magellán Felhők távolsága, amelyre Kovács Géza (2000) 63,1, illetve 50,1 ezer parszek értéket kapott. Az eredmény az ún. 'hosszú távolságskálát' igazolja.



Az előzőekben tárgyalthoz hasonló csillagokban csak elvétve figyelhető meg egy harmadik, elkülönült fizikai periodicitás (nem beleértve a fő rezgések periódusához közeli rezgéseket, amelyekre később térek ki). Három periódus már nagymértékben lezorítja a csillag lehetséges fizikai paramétereinek körét. Azonban az ilyen csillagok elenyésző számúak, valószínűleg különleges fizikai állapotuknak megfelelően. A V823 Cassiopeiae változócsillag esetében például a csillag valószínűleg egy rövid, átmeneti időszakban tartózkodik (Jurcsik et al., 2006), ami csak időszakos hárommódusú rezgést jelez.

A klasszikus változócsillagok (RR Lyrae és cefeida csillagok) változásának sok esetben megfigyelhető modulációja újabb, egyidejűleg jelen lévő rezgési állapotokra utal. Az RR Lyrae csillagok esetében a jelenség Blazhko-effektus néven már régóta ismert. Míg a hasonló csillagok „normális” csoportjában csak egy periodicitás észlelhető, a modulációt mutató csillagokban a rezgés közeli periódusok összegeként jön létre. Alapesetben a csillag rezgései csak sugárirányúak, míg a leginkább elfogadott elképzelések szerint a modulációért felelős újabb rezgések már nemradiális mozgásokkal járnak. Még ma is nyitott kérdés, hogy mi határozza meg ezen oszcillációk jelenlétét a radiális irányú löktetések mellett.

Míg a radiális csillagpulzáció esetén a nemlineáris modellek ma már egyszerűen számíthatók, a nemradiális rezgésekre ez még megoldhatatlan feladat. Az egyszerűbb közelítés, a csillag stabilitásvizsgálata az általánosabb esetben is elvégezhető, de ez csak részben ad választ a felvetődő kérdésekre. A lehetséges periódusok meghatározhatók, de a lehetséges amplitúdók már kívül esnek a megoldható körön. A sugárirányú mozgás egydimenziós leírást tesz lehetővé, ehhez képest az általános esetben, amikor már nemradiális mozgások is lehetségesek, há-

romdimenzióssá válik a megoldandó feladat. A szabadsági fokok növekedése indokolja a lehetséges rezgési állapotok számának jelentős növekedését. Teljes, nemlineáris, háromdimenziós pulzációs számolások a szükséges számítási kapacitás hiánya miatt nem várhatók az elkövetkező években, pedig a megfigyelések jelentős kísérleti terepet szolgáltatnak.

Több csillagcsoport is létezik (ezek például a  $\delta$  Scuti csillagok, az oszcilláló fehér törpék), amelyekben rezgések sokasága figyelhető meg. Míg kétmódusú cefeidák és RR Lyrae csillagok esetében a rezgési állapotok azonosítása általában egyértelmű – például a periódusok aránya meghatározza azt –, a  $\delta$  Scuti csillagok esetében az azonosítás általában nehéz. Ez jelenleg egy nagyon jelentős hátrány, hiszen a rezgési állapotok azonosításuk után felhasználhatók lennének a csillag belső szerkezetének meghatározására – azaz csillagszeizmológiai kutatásokra (hasonlóan, mint ahogy a földrengések a szeizmológiának útján segítenek a Föld belső rétegződésének meghatározásában). A rezgési állapotok azonosítására elsősorban empirikus módszerek léteznek. A különböző színekben mért változások segíthetnek a rezgési állapotok belső rendjének feltárásában, mint például az a  $\theta$  Tucanae csillag esetében történt (Paparó – Sterken, 2000). A talált rezgési állapotok csoportjai segíthetnek azok azonosításában, hozzájárulva a csillagszeizmológiai kutatásokhoz.

Az, hogy az egyes periodicitások milyen erősséggel, mekkora amplitúdóval jelennek meg, még ma is magyarázatra szorul. Nem meglepő ez a rendszer komplexitása miatt. Még lényegesen egyszerűbb rendszerekre, mint például egy gitárhúr relatív rezgési amplitúdójának is csak a közelmúltban jelentek meg reális modelljei. A hűrt rendkívül egyszerű hangzó rendszerként szokták bemutatni, viszont a valóságban ott is megjelennek a következő rezgési állapotok (hossz és keresztirányú

rezgések) nemlineáris kölcsönhatásai a fel-függesztések rugalmasságán keresztül. Ezt a kapcsolatot elhanyagolva a gitárhúr telt felhangszerkezete értelmezhetetlen lenne. A csillagok akusztikája sokban hasonlít a hangszerekéhez, de azokhoz képest sokkal bonyolultabb.

A csillagrezgések nemcsak a nemradiális mozgások miatt válnak összetettebbé, hanem olyan csatolások miatt is, mint a kettőscsillagokon belüli kölcsönhatás. A klasszikusan jól modellezett csillagok is olyan folyamatokat mutathatnak, ha nem egyedül állnak a világűrben, amelyek nehezebben értelmezhetőek. Ilyenek pl. a cefeida csillagok hirtelen fázisugrásai (Szabados, 2003). A numerikus modellezés is egyre bonyolultabbá válik ahhoz képest, mint ami a cefeidák és RR Lyrae csillagok alapvető jelenségeinek visszaadásához szükséges volt. Elkerülhetetlenné vált, hogy a csillagmodellek újabb generációját fejlesszük ki,

csak ezért is, hogy a viszonylag „egyszerű” csillagok esetében is lehetőség legyen a csillagszeizmológiai vizsgálatokra. Jelenleg a mi csoportunk is egy ilyen fejlesztés végén jár – remélhetőleg az elkövetkező években még többet megértünk majd a csillagok zenéjének belső harmóniájából, a hangzások kölcsönhatásából. Mindezek a csillagok belső fizikai folyamatairól árulkodnak, egy olyan laboratóriumról, amelyet földi viszonyok között nem reprodukálhatunk.

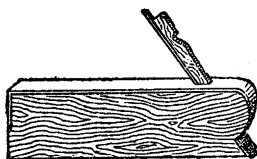
Cikkünkben a változócsillagok kutatásának is csak egy szegmensével foglalkozhattunk, hiszen a bemutatott témában is folynak egyéb kutatások, és jelentős eredmények születtek például a csillagaktivitás okozta fényváltozások kapcsán is. A teljes hazai csillagászati kutatások bemutatása pedig még nagyobb terjedelmet igényelne.

*Kulcsszavak: asztrofizika, változócsillagok, hidrodinamika*

#### IRODALOM

- Kolláth Zoltán – Beaulieu, J. P. – Buchler, J. R. – Yecko, P. (1998): Nonlinear Beat Cepheid and RR Lyrae Models. *Astrophysical Journal*. **502**, L55–L58.
- Kovács Géza (2000): The Distance Modulus of the Large Magellanic Cloud Based on Double-mode Cepheids. *Astronomy & Astrophysics*. **363**, L1–L4.
- Jurcsik Johanna – Szeidl B. – Váradi M. – Henden, A. – Hurta Zs. – Lakatos B. – Posztobányi K. – Klagyivik P. – Sódor Á. (2006): The Triple-mode Pulsating Variable V823 Cas. *Astronomy & Astrophysics*. **445**, 617–625.

- Szabados László (2003): Variable Star Research with Small Telescopes. In: Oswalt, T. D. (ed.): *The Future of Small Telescopes in the New Millennium*. Vol. III. Kluwer, 207–223.
- Szabó Róbert – Kolláth Z. – Buchler, J. R. (2004). Automated Nonlinear Stellar Pulsation Calculations: Application to RR Lyrae Stars. *Astronomy & Astrophysics*. **385**, 932–939.
- Paparó Margit – Sterken, Chris (2000). The  $\alpha$  Scuti Star  $\epsilon$  Tucanae III. Observational Guidelines for Mode Identification. *Astronomy & Astrophysics*. **362**, 245–254.



# KVARK-TOMOGRAFIA: FEMTOMÉTERES ANYAGMINTÁK VIZ- GÁLATA A MAGFIZIKÁBAN

Lévai Péter

az MTA doktora, KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet Elméleti Főosztály  
plevai@rmki.kfki.hu

A tudományos kíváncsiságunk csaknem háttérbe. Egyrészt űrteleszkópokat küldünk föl a földi légkörön túlra, hogy még tisztább képet kaphassunk az Univerzumból, a tízmilliárd fényévnyi ( $10^{26}$  m) távolságban lévő objektumokról. Másrészt 10-20 kilométer hosszú alagutakat vájunk a föld alá, hogy nagyenergiás atommaggyorsítók segítségével betekinthessünk a femtométeres ( $10^{-15}$  m) hosszskálán uralkodó törvények működésébe, az anyag ott található formáiba. A két méret között negyven nagyságrend a különbség. De ami a legérdekesebb, hogy amit a méretskála két végén látunk, az szorosan kapcsolódik egymáshoz. Hiszen 13-14 milliárd fényévnire olyan objektumokat látunk, amelyek az Univerzum nagyon korai állapotában léteztek, s az akkori viszonyokról üzennek. Ugyanakkor a gyorsítóknak létrehozott relativisztikus nehézion-ütközésekben olyan nagy energiasűrűségű állapotokat tudunk létrehozni, amelyek csak az Univerzum kezdetén, annak kialakulásakor uralkodhattak, s ezért közvetlenül befolyásolhatták a korai Univerzum szerkezetét. Azaz a nehézion-ütközések vizsgálata során kapott eredmények alakíthatják a Világegyetemünkről, különösen annak korai szakaszáról alkotott képünket. A nehéz atommagok (Au, Cu, Pb, U, In) ütköztetésével azonban csak femtométeres méretben alakul ki a vizsgálni kívánt őanyag, ráadásul csak rövid ideig

(Csörgő – Lévai, 2004). Ha meg akarjuk tudni, hogy milyen részecskékből áll, miként viselkedik, milyen fizikai tulajdonságokkal jellemezhető ez az anyagminta, akkor ehhez új diagnosztikai módszereket kell kifejlesztünk és alkalmaznunk.

Ez a cikk egy új vizsgálati módszerről, a kvar-k-tomográfiáról, valamint az eljárás segítségével szerzett új ismeretekről szól. Az eljárás alapötlete tizenöt évvel ezelőtt merült föl (Gyulassy – Plümer, 1990): a nehézion-ütközésben keletkező kisszámú, de nagyon nagy energiás részecskéket használjuk fel arra, hogy lemérjük az anyagminta tulajdonságait, ahol az anyag a nagy számban jelen lévő, de alacsony energiás részecskékből áll. A nagyenergiás részecskék energiát veszítenek az anyagmintán való áthaladásakor, mert a sokszoros ütközés és kölcsönhatás sugárzás kibocsátására kényszeríti őket. Ha összehasonlítjuk a nehézion-ütközésekben mért részecskeeloszlásokat a proton-proton ütközésekben mért eloszlásokkal, illetve azok megfelelő szuperpozíciójával, akkor világosan leolvasható lesz az energiavesztés. (A proton-proton ütközések helyes felösszegzését Roy Glauber mutatta meg a 60-as években, ez a 2005-ben Nobel-díjjal elismert optikai koherencia kutatási eredményeinek egyik következménye volt.) Így megmondhatjuk, hogy mekkora sűrűségű a kialakult kollektív állapot. Az analízis elvégzéséhez azonban szükség

volt a nagyenergiás részecskék indukált energiavesztésének kvantitatív leírására egy olyan környezetben, amelyet az erős kölcsönhatás határoz meg. Az elméleti háttér részletes kidolgozása 2000-re meg is történt (lásd például a Gyulassy et al., 2000, 2001 cikkeket), és ezzel a gyakorlatban is alkalmazhatóvá vált a kvark-tomográfia a nehézion-ütközésekben.

2005. augusztus 4-9. között Budapesten zajlott a XVIII. Quark Matter konferencia (Csörgő Tamás et al., 2006). A konferencia nyitó előadását Roy Glauber tartotta. Ez egyrészt azt mutatja, hogy eredményei mennyire fontosak a magfizika területén, másrészt azt is mutatja, hogy a nagyenergiás magfizika legújabb eredményei mennyire szorosan kapcsolódnak a fizika legkiválóbbnak tartott alkotóihoz. A konferencián elhangzott kísérleti eredmények, valamint azok elméleti analízise kiváló alkalmat nyújt arra, hogy összefoglaljuk, mit is lát a kvarktomográfia a nehézion-ütközésekben, mit sikerült megértenünk az elmúlt öt év során.

A kvark-tomográfias eljárás jobb megértése szempontjából hasonlítunk össze ezt a módszert az orvostudományból jól ismert, a centiméteres skálán alkalmazott tomográfias eljárásokkal (Faigel, 2005):

A.) *CT – Computer Tomography*, azaz számítógépes tomográfia – a legelterjedtebb orvosi képalkotó módszer. A 3D objektumokon külső forrásból eredő lágy röntgensugárzást bocsátunk keresztül. Megmérjük a szövetek abszorpcióját sok-sok egydimenziós vonal mentén, majd ezekből az adatokból egy matematikai eljárással helyreállítjuk a szövetek sűrűségének kétdimenziós metszeti képét. Egymás mellé rakva ezeket a 2D-szeleteket, megkaphatjuk a teljes test szövetsűrűségét három dimenzióban. Nemcsak az egészségügyben, hanem a szilárdtestfizikai mintáknál is használható ez az eljárás. Nagyobb energiájú röntgensugárzást és hosszabb besugárzási időt alkalmazva speciálisan keveredő vagy

olvadékból megszilárduló anyagokról, azok belső szerkezetéről roncsolás nélkül készíthetőek 3D-felvételek. A képesség 1-2 mm.

B.) *PET – Positron Emission Tomography*, azaz pozitron emissziós tomográfia. Gyorsan bomló radioaktív fluor izotópot ( $F^{18}$ ) tartalmazó cukorszerű vegyületet juttatunk a véráramba, amely ott dúsul fel, ahol sejttaktivitás folyik (különösen a dagantos sejteknél). A fluor izotóp pozitronkibocsátás mellett elbomlik. A keletkezett pozitron annihilálódik egy jelen lévő elektronnal, és két darab monoenergiás ( $E=511$  keV)  $\gamma$ -foton keletkezik, amelyek egymással ellentétes irányban elhagyják a vizsgált testrészt. A test köré helyezett  $\alpha$ -detektorokkal geometriailag elég pontosan meghatározható a keletkezési pont. Nagyszámú  $\gamma$ -foton pár beérkezése után kirajzolható a nagy élettani aktivitást mutató területek háromdimenziós térképe. A képesség 2-5 mm.

C.) *QT – Quark Tomography*, azaz kvarktomográfia. Az anyagminta belsejében nagy impulzussal, párban keletkező, egymással ellentétes irányba elinduló kvarkok attól függően vesztik el energiájukat, hogy mekkora sűrűségű közegben haladnak keresztül. Forrásként a proton-proton ütközésekben meghatározott kezdeti kvarkeloszlást használhatjuk. Mivel az energiavesztés mértékét elméletileg, a végállapotú hadronok kvarkokból való keletkezését pedig kísérletileg elég jól ismerjük, ezért a mérhető hadroneloszlásokban látott változásokból multidimenziós integrálok elvégzésén keresztül meghatározhatjuk a forró tartomány sűrűségének időbeli átlagát. Dinamikai ütközési modellek alkalmazásával az időbeli átlagot szétbonthatjuk, és meghatározhatjuk a kezdeti sűrűséget. Amennyiben mindkét, ellentétes irányba kirepülő kvarkot detektálni tudjuk, s a keletkezett hadronok szögeloszlását is megmérjük, akkor a sűrűség térbeli eloszlására is pontos információt kaphatunk. A módszer jelenlegi felbontási képessége 3-5 femtométer.

Amint látjuk, az eljárásokban sok hasonlóság, de némi különbség is van. A kvar-k-tomográfiában keveredik a CT-ben alkalmazott energiaelnyelődés a PET azon tulajdonságával, hogy a vizsgálati eszköz (a nagyenergiás kvar-k) magában az anyagban keletkezik, s onnan jön ki a detektorhoz. Egy fontos különbség, hogy a CT-ben az elektromágneses kölcsönhatás írja le az energiavesztést, a QT-ben pedig az erős kölcsönhatás. A kvar-k-tomográfias analízis nagyon jelentős numerikus erőfeszítést igényel, s a kapott eredmények megkövetelik azok továbbgondolását, kiértékelését.

Mielőtt bemutatnánk, milyen eredményre vezet a kvar-k-tomográfia alkalmazása, néhány szót szólnunk kell arról, hogy milyen körülmények jönnek létre a nagyenergiás nehézion ütközésekben, milyen tulajdonságokkal rendelkezik az az anyag, amelyet vizsgálni kívánunk, milyen kvalitatív adatokat várunk a diagnosztikai eljárásunk alkalmazása során.

Az atommagok pozitív töltésű protonokból és semleges neutronokból állnak, ezeket közös néven nukleonoknak hívjuk. Például az arany atommagban 79 proton és 118 neutron, azaz 197 nukleon található. A protonok és neutronok tömege magfizikai egységekben kifejezve 940 MeV (millió elektronvolt), azaz közel 1 GeV (milliárd elektronvolt). Mivel a sugaruk kb. 1 fm, ezért az általuk hordozott energiasűrűség kb.  $0,3 \text{ GeV/fm}^3$ . A brookhaveni RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) gyorsítóban az arany atommagokat 100 GeV/nukleon energiára gyorsítják, azaz nyugalmi tömegük százszorosára. Ekkor már nagyon erőteljesen jelentkeznek a relativisztikus effektusok, például az arany atommag mérete a mozgási irányában ún. Lorentz-kontrakciót szenved, közel századrészére lapul össze. Azaz ha két arany atommagokat tartalmazó nyalábot egymással szemben keringetünk a gyorsítóban, akkor az ütközési pontokban 13 femtométer átmérőjű, de 0,1 femtométer vastagságúvá összehúzóerődött

arany atommagok ütközéseit látjuk. Ekkor az arany atommag közel  $40\,000 \text{ GeV}$  mozgási energiája egy, a laboratóriumból  $13 \text{ fm}^3$ -nek látszó térfogatba koncentrálódik. Ha a két atommag teljesen lefékeződne, akkor  $3000 \text{ GeV/fm}^3$  energiasűrűség jönne létre, a protonok és neutronok eredeti energiasűrűségének tízezerszerese. Mivel azonban az atommagok csak részlegesen állnak meg egymáson, valamint a Lorentz-kontrakció is kissé bonyolultabban érvényes az atommagokra, ezért a kísérletben ennél sokkal kisebb energiakoncentráció jön létre, az elméleti számolások szerint kb.  $100 \text{ GeV/fm}^3$ . Ilyen energiasűrűségeknél kérdéses, hogy vajon léteznek-e még protonok és neutronok.

Az erős kölcsönhatást leíró kvantum-színdinamika (QCD) szerint a kiterjedt protonok és neutronok még elemibb részecskékből, pontszerűnek tekintett kvar-kokból és gluonokból állnak. A QCD egyenleteinek egzakt megoldásait nem ismerjük. Numerikus megoldásokat viszont kaphatunk, ha egy diszkrét térítő rácson oldjuk meg az elméletet. Ez a rác-QCD. A számítások azt mutatják, hogy kb.  $2 \text{ GeV/fm}^3$  energiasűrűség elérése esetén a kvar-kok és gluonok kiszabadulnak a nukleonokból. Ez azt is jelenti, hogy  $100 \text{ GeV/fm}^3$  esetén már ezzel a QCD-anyaggal, szokásos nevén kvar-k-gluon plazmával találkozunk. Sőt, amíg a nagy energiakoncentráció le nem csökken a kritikus  $2 \text{ GeV/fm}^3$ -re, addig ez a plazmaállapot tölti ki a reakcióterületet. A táguló forró anyag csak a  $T_c = 170\text{--}200 \text{ MeV}$  kritikus hőmérséklet elérése esetén alakul vissza protonokká, neutronokká, valamint más hadronikus részecskékké. Ezt a visszaalakulási folyamatot hadronizációnak nevezzük.

Ha változtatjuk az atommaggyorsító energiáját, akkor változik az ütközésben elért energiakoncentráció nagysága, és a vizsgálni kívánt anyagmintánk hosszabb vagy rövidebb időt tölt a kvar-kok és gluonok által dominált állapotban. De végeredményképpen a forró anyag tágulásának végén, minden

esetben visszajutunk a kb.  $2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  energiasűrűséghez, ahol lejátszódik a hadronizáció, és az ideiglenesen szabaddá vált kvarkok és gluonok visszazárulnak a hadronokba. Ráadásul ez a kritikus energiasűrűség kb. ugyanahhoz a kritikus hőmérséklethez tartozik minden esetben, azaz a keletkezett hadronok mérhető spektruma nagyon hasonló lesz. Jórészt csak a keletkezett hadronok száma emelkedik az ütközési energia logaritmusával. Minket azonban a QCD-anyag tulajdonságai érdekelnek. Első pillantásra úgy tűnik, hogy a végállapotú hadronokból nehéz pontos információt szerezni az ütközés korai állapotáról. Hogyan tudnánk az anyagot akkor tanulmányozni, amikor az kvarkokból és gluonokból áll? Hogyan láthatnánk bele a nagy energiasűrűségű állapotokba?

Ennél a pontnál lép be a kvark-tomográfia, mely eljárás pont a kölcsönhatás meglétének alapul: az ütközés korai állapotában keletkező nagyenergiás kvarkok részt vesznek az erős kölcsönhatásban, és „látják” a vizsgálni kívánt anyagmintát. Érdekes kérdés, hogy mely kvarkokat tudjuk legjobban használni, mi az az energiaablak, ahol a legbiztosabban látunk. A QCD alaptulajdonságai közé tartozik az aszimptotikus szabadság (ennek felismeréséért kapta meg a fizikai Nobel-díjat David Gross, David Politzer és Frank Wilczek 2004-ben). Azaz minél nagyobb energia- vagy impulzuscsere jön létre két szintöltéssel rendelkező objektum összetételalkozása során, annál kisebb a folyamat erőssége (egyben valószínűsége). Így a szuper nagy impulzusú ( $p_T=50\text{-}80 \text{ GeV}/c$ ) kvarkok kölcsönhatása a QCD-anyaggal nagyon kicsi lesz, azok szinte háborítatlanul folytatják útjukat, így jó referenciaként szolgálhatnak. Azonban ahogy csökken az áthatoló kvarkok impulzusa, úgy erősödik föl ez a kölcsönhatás. Jelenleg képesek vagyunk  $p_T=15\text{-}20 \text{ GeV}/c$  impulzusú hadronok azonosítására, kimérésére. Ez azt jelenti, hogy kb.  $p_T=20\text{-}25 \text{ GeV}/c$  impulzusú kvarkokról kaphatunk információt. A

számunkra érdekes tartomány alsó határa ugyanakkor  $p_T=2\text{-}3 \text{ GeV}/c$ , mert az ennél alacsonyabb impulzusú részecskék már magát az anyagmintát alkotják, s nem választhatóak el. Azaz vizsgálati eszközeink a  $2 < p_T < 20 \text{ GeV}$  impulzustartományba eső kvarkok lesznek. (Tárgyalásunk során a  $p_T$  transzverzális impulzust azért használjuk, mert az eredetileg ütköző protonok és neutronok csak longitudinális impulzussal rendelkeztek, azaz minden nagy transzverzális impulzusú részecske a két atommag átfedése során, kölcsönhatás eredményeként keletkezett, és szóródott ki a merőleges irányba.)

A kvarkok energia- és impulzusvesztése egy nagyon érdekes jelenség. A közelmúltban elvégzett elméleti számolásaink (lásd Ref. 3) azt mutatták, hogy a szintöltéssel rendelkező közeg indukált gluon-sugárzást vált ki a rajta áthaladó, szintöltéssel rendelkező kvarkból és gluonból. Minél sűrűbb a közeg, annál intenzívebb a sugárzás, azaz annál több impulzust veszít a teszt részecske. A perturbatív QCD keretei között elvégzett számolás során sikerült úgy átrendeznünk a kölcsönhatási gráfokat, hogy az átvilágítandó anyag sűrűségét, pontosabban opacitását tartalmazó sorfejtést kaptunk, amely nagyon gyorsan konvergál, és kvantitatív eredményeket ad az impulzusvesztés meghatározásához. A numerikus számolások azt mutatták, hogy a kvarkok és gluonok energiavesztése a számunkra érdekes  $p_T$ -tartományban a közeg opacitásával (sűrűségével) négyzetesen növekszik, saját impulzusának nagyságától függetlenül. Ez egyben azt is jelenti, hogy az energiavesztés az anyagmintában befutott hossz négyzetével arányos. (Azaz sokkal intenzívebb, mint az elektromos töltések esetén, amikor az energiavesztés csak a befutott hosszal arányos.) Másrészt azt láttuk, hogy a kvarkok és a gluonok a szintöltésükkel arányosan sugároznak. Miután a gluonok szintöltése ( $C_A=3$ ) nagyobb a kvarkok szintöltésénél ( $C_F=4/3$ ), ezért a gluonok 2,25-ször

több impulzust veszítenek ugyanolyan sűrűségű közegen való áthaladásakor. Ebből az is látszik, hogy ugyanazon az anyagon a gluonok nagyon könnyen elveszíthetik az összes energiájukat, és gyorsan beolvadhatnak a vizsgálni kívánt anyagba. Ezzel szemben a kvarkok még mindig jól azonosíthatóak maradnak, ezek még további kiolvasható információkat hordoznak. Ezért is kapta az eljárás a kvark-tomográfia nevet. Másik érdekes elméleti eredmény, hogy míg a leggyakrabban előforduló, könnyű  $u$ ,  $d$  és  $s$  kvarkok kb. azonos mértékben veszítenek energiájukból, addig a ritkán keletkező, jóval nehezebb  $c$  és  $b$  kvark ( $m_c = 1,5 \text{ GeV}$ ,  $m_b = 4,5 \text{ GeV}$ ) várhatóan jóval kisebb energiavesztést szenved ugyanazon közegben. Így a könnyű és nehéz kvarkok energiavesztésének tanulmányozása, a kapott értékek egymáshoz való hasonlítása további információval szolgálhat a keletkezett anyagról.

Tekintsük először a kísérletileg mért egyrészecske-eloszlásokat, például arany atommagok ütközésekor mért pion-eloszlást. Ekkor a RHIC gyorsítóban azt látjuk, hogy a centrális atommagütközésekben a pionok száma a vizsgált  $2 < p_T < 20 \text{ GeV}$  tartományban közel ötödére csökken ahhoz az értékhez képest, amelyet a proton-proton ütközések Glauber-féle felösszegzése után kapnánk, amikor nem tekintünk semmiféle közbenső kollektív állapotot. Azaz a QCD-anyag a keletkezett nagyenergiás kvarkok energiájának 80 %-át felemésztette. Ehhez 1100-1200 színtöltés (alacsony impulzusú kvark és/vagy gluon) jelenléte szükséges. Mivel a hideg proton-neutron anyag esetén csak 150-200 színtöltésünk van, biztosan állíthatjuk, hogy a kvarkok energiavesztése a színes részecskék sűrűségének ugrásszerű megnövekedését jelenti. Felmerülhet, hogy jó-e a referenciánk, jól alkalmazzuk-e a Glauber-elméletet a proton-proton ütközések felösszegzésekor. A választ a centrális arany-arany ütközésekben mért fotonok adják

meg. A fotonok nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, nem látják a kialakult kollektív állapotot, energiavesztés nélkül szökhetnek meg az ütközési térfogatóból. A 2005 elején ismertté vált mérési adatok szerint a fotonok követik a Glauber-elméletet, és ahogy vártuk, semmiféle elnyomást nem mutatnak. Azaz jó a leírásunk, a kvarkokat tényleg elnyeli a közeg. Az arany-arany ütközésben keletkező fotonok spektrumát a RHIC PHENIX együttműködés kimérte, és meghatározta a sugárzást kibocsátó anyag hőmérsékletét. Eredményül azt kapták, hogy a kollektív állapotban  $T=350 \text{ MeV}$  körüli átlagos hőmérséklet uralkodik, ami akár  $T_0=570 \text{ MeV}$  kezdeti hőmérsékletet is jelenthet a  $t_0=0,15$  femtomásodperc időpontban. Ilyen magas hőmérsékleten már csak a plazmaállapot létezhet. Ezek a hőmérsékletértékek további pontosításra várnak még, de az előzetes eredmények nagyon biztatóak.

Ha kétrészecske-korrelációkat kezdünk el vizsgálni, akkor tovább mélyíthetjük az ismereteinket. A legfontosabb eredmény, hogy ha kiválasztunk egy nagyenergiás kvarkot, ezzel egy nagyenergiás kvarkot vagy gluont, akkor  $\sqrt{s}=200 \text{ AGeV}$ -en elvégzett centrális arany-arany ütközésben a párjaként keletkezett másik nagyenergiás kvark és/vagy gluon, illetve a belőle keletkezett hadron nem jelenik meg a detektorban: a keletkezett forró anyag felemészteti annak minden energiáját. Az energia azonban nem oszlik el teljesen, a mért részecskeeloszlásokat lökeshullámok kialakulásával magyarázhatjuk. Mint amikor a hangsebességet túllépő repülő hangrobbanást idéz elő, a nagyenergiás kvark is lökésfrontot hoz létre, és az energiáját a front emésztí föl. A lökésfrontok vizsgálatából a közegben uralkodó hangsebességre következtethetünk, ami szorosan kapcsolódik az anyag mikroszkopikus szerkezetéhez. Igazán nagy energiájú hadronok esetén persze újra megtaláljuk a két, ellentétes irányú kvarkot, illetve kevésbé

centrális ütközésekben szintén megjelennek ezek a párok – hogy aztán periferikus ütközésben visszaálljon a proton-proton vagy deutérium-arany ütközésekből ismert állapot. Az elvégzett elméleti számolások lehetőséget adnak arra, hogy a különböző centralitású ütközéseket együtt vizsgálhassuk. Az átfedési tartományok geometriai jellemzőit kitranszformálva azt látjuk, hogy a centrális és közel-centrális ütközésekben létrejön a nagy sűrűségű, kvark-gluon plazmaszerű állapot, míg a periferikus ütközések felé haladva fokozatosan csökken a kialakult sűrűség. A lökéshullámok megjelenése azonban abba az irányba mutat, hogy további információkat a háromrészesceke-korrelációk kísérleti és elméleti vizsgálatából szerezhethünk.

Amint láthatjuk, nagyon sok jel utal a kollektív kvark-gluon plazmaállapot megjelenésére. Egy koherens kép kialakulásához fontos adalékot jelentene a nehéz bájós kvarkra vonatkozó kísérleti eredmények analízise. A Quark Matter konferencián kerültek bemutatásra a legújabb adatok a bájós kvarkot tartalmazó D-mezon spektrumában látható elnyomás mértékéről centrális és kevésbé centrális arany-arany ütközésekben. Azt vártuk, hogy jóval szerényebb lesz az effektus, mint például a pion esetében. Ezzel szemben azt láthatjuk, hogy a D-mezon spektrumában látható elnyomás közel akkora, mint a pionoké. Ez az eredmény kérdések

sorát veti föl, amelyek megválaszolásához további adatokra és elméleti vizsgálatokra van szükség. Hogyan tud olyan sűrű és intenzív kölcsönható lenni a kvarkanyag, hogy a nehéz kvarkok is energiát veszítsenek? Hogyan képesek a nehéz kvarkok együtt mozogni a könnyű kvarkokkal, ahogy azt a kollektív mozgást azonosító elemzések mutatják (lásd az áramlási kép magasabb momentumait, mint például az „elliptikus folyás”)? Megannyi megválaszolásra váró kérdés.

Amit biztosan tudunk állítani, hogy a brookhaveni RHIC gyorsítóban arany atommagok ütköztetésével igen különös, új anyagot sikerült létrehozunk, amely nagyon sok energiát képes elnyelni, felemészteni, ami színes részecskéket (kvarkokat és gluonokat) tartalmaz nagyon nagy sűrűségen, és amely igazi anyagmintaként jelenik meg, mert kollektív jelenségeket tudunk benne azonosítani. 2004-2005-ben hatalmas mennyiségű adatot gyűjtöttek össze a RHIC gyorsító detektorainál, amelynek csak kis részét sikerült analizálni a Quark Matter konferenciára. Amint a teljes anyag kiértékelése befejeződik, várhatóan választ kapunk még meglévő kérdéseinkre is, többek közt a kvark-tomográfias eljárás közvetlen alkalmazásával.

Kulcsszavak: *Univerzum, őanyag, tomo-gráfia, kvantum-színdinamika (QCD)*

#### IRODALOM

- Gyulassy Miklós – Plümer, Michael (1990): Jet Quenching In Dense Matter. *Physical Review Letters*. **B243**, 432.
- Gyulassy Miklós – Plümer, Michael (1990): Jet Quenching as a Probe of Dense Matter. *Nuclear Physics*. **A527** 641.
- Gyulassy Miklós – Lévai P. – Vitev I. (2000): Non-Abelian Energy Loss at Finite Opacity. *Physical Review Letters*. **85**, 5535.
- Gyulassy Miklós – Lévai P. – Vitev I. (2000): Jet Quenching in Thin Quark Gluon Plasmas. 1. Formalism. *Nuclear Physics*. **B571**, 197.

- Gyulassy Miklós – Lévai P. – Vitev I. (2001): Reaction Operator Approach to Non-Abelian Energy Loss. *Nuclear Physics*. **B594**, 371.
- Csörgő Tamás – Dávid Gábor – Lévai Péter – Papp Gábor, a konferenciakötet szerkesztői (2006): Quark Matter 2005 konferencia, 2005. aug. 4-9 Budapest: <http://qm2005.kfki.hu/>. A konferencia főszervezői: Zimányi József (tb. elnök), Lévai Péter (elnök) és Csörgő Tamás (társelnök). A konferencián 610 kolléga vett részt, 160 előadás hangzott el. Az eredmények a *Nuclear Physics A*-ban jelennek meg 2006-ban.
- Fajgel Gyula (2005): Orvosi képalkotó eljárások I-II. *Fizikai Szemle*. **2**, 83.; **7**, 260.



# PROTONVEZETÉS FEHÉRJÉKBEN

Maróti Péter

a biológiai tudomány doktora, egyetemi tanár  
SZTE Biofizikai Tanszék – pmaroti@physx.u-szeged.hu

Gerencsér László

posztdoktori Bolyai-ösztöndíjas  
SZTE Biofizikai Tanszék

*Mózes ekkor kinyújtotta kezét a tenger fölé. Az Úr egész éjjel tartó erős keleti széllel vissz-szaszorította a tengert és kiszárította. A víz kettévált, és Izrael fiai a száraz tengerfenéken vonultak át, miközben a víz jobb és bal felől úgy állt, mint a fal. (Biblia, Kivonulás könyve, 13, 21-22). Mózes kinyújtotta kezét a tenger fölé. Erre a víz napkeltekor visszaáramlott régi helyére, amikor az egyiptomiak éppen arra menekültek. Az Úr besodorta őket a habok közepébe. (Biblia, Kivonulás könyve, 14, 27)*

Ámuletba ejtő a hasonlóság a kiválasztott népnek a Sás-tengeren való átvonulása, illetve a protonoknak hidrogénhidakkal szorosan összekötött rendszeren, például vízben való különlegesen hatékony vezetése között. A proton a hidrogénhidak által meghatározott irányban nagy sebességgel vándorolhat, ha előtte felbomlik, utána pedig bezáródik a hidrogénhid-kötés. Ezt a mechanizmust a látnoki képességű *Theodor Grotthus* ismerte fel éppen két évszázaddal ezelőtt (1806), amikor még meg sem született az anyag Dalton-féle atomelmélete (1808), és még nem is ismerték a víz helyes kémiai szerkezetét. Az állandósult protonvezetéshez a H-hidakkal összekötött láncnak legalább kétféle mozgást kell végeznie, hogy a proton tényleges elmozdulás nélkül kerülhessen a lánc elejéről a végére, mint ahogyan az álló és egymással érintkező biliárdgolyók közül a

szélső kilendül, ha a másik szélről centrálisan egy másik biliárdgolyót ütköztetünk. Az egyik mozgás az *ugrás*, amelynek során minden proton a vezetés irányába eső szomszédos helyre kerül, a másik a *forgás*, amellyel a H-híd hálózat az eredeti alakzatát veszi fel.

A proton kiemelkedően nagy mozgékony-ságának egyszerűen az az oka, hogy megnövekedett a lépéshossz a véletlenszerű vándorlás során: a proton egy vízmolekula átmérőjének megfelelő távolságot (0,25 nm) lép a víz rotációs relaxációs ideje alatt. A protonvándorlás sebességének meghatározó lépése a H-kötések koordinált átrendezése. Ennek megfelelően az aktivációs energia csekély, közelítőleg 2,5 kcal/mol, amely tipikusan a víz-víz H-kötés felszakításából származik.

## *Biológiai jelentőségű protonvándorlás*

A protonvándorlás a biológiai rendszerekben is fontos. Számos olyan biológiai folyamat ismert, amelynek lényeges eleme a kis vagy nagy távolságú protonátadás (protontransfer – PT). Az előbbire példa az enzimek aktivitásában fontos szerepet játszó savbáziskatalízis, amelyben a PT nagyon lokalizált, és elsődleges célja a szomszédos csoportok, például egy aktív helyen levő aminosav és egy szubsztrát közötti protonátadás (Eigen, 1964). Noha a katalitikus helyekről a vízmolekulák általában kiszorulnak, az enzim aktív helye és az oldat között azonban speciálisan

rendezett láncolatuk alakulhat ki. Ez az orientált szerkezet könnyen polarizálódik a katalitikus helyen bekövetkező töltésetlődásra (PT-re). Jellemző példa a *szuperoxid dizmutáz* (SOD) enzim, amely az emlősök szöveteiben, szív, máj, agy stb., vérben, növényekben, algákban és aerob baktériumokban nagyon elterjedt. A szerkezet méregtelenítése a nagyon roncsoló hatású szuperoxidtól ( $O_2^-$ -tól) ún. „ping-pong” mechanizmussal történik, amelynek második reakciójában protonátadás zajlik:  $SOD + O_2^- \rightarrow SOD^- + O_2$  és  $SOD^- + O_2^- \rightarrow SOD + H_2O_2$ .

Nagy hatótávolságú PT jellemzi a protonpumpaként működő fehérjéket például *bakteriorodopszint*, *citokróm oxidázt*. Ezek olyan bioenergetikai folyamatok motorjai, amelyek protongradienst építenek fel a biomembránok két oldala között, és ezzel létrehozzák az élőlények egyik legfontosabb, gyorsan felépíthető és felhasználható szabadenergia-forrását (Sass et al., 2000). Mivel eza terület saját kutatásainkhoz kapcsolódik, később külön fejezetben mutatjuk be, hogyan valósulnak meg a nagy hatótávolságú PT szerkezeti, energetikai és kinetikai feltételei a fotoszintetikus baktériumok *reakciócentrumában* (RC). Mielőtt erre áttérnénk, még két gondolatot szeretnénk fűzni az általános bevezetőhöz.

Az egyik, hogy a protont transzportáló fehérjékben is kialakulhatnak a Grotthus-mechanizmus működésének jellemzői, de a valódi képet mind szerkezeti, mind energetikai oldalról több „tökéletlenség” is bonyolítja. A lánc töredezett, ha az egyes szomszédos elektronegatív atomok (általában O és N) a H-kötés távolságánál messzebb vannak. Ezen természetesen segíthet egyrészt a molekulamozgás, amely a láncot időlegesen folytonossá teszi, és ezalatt a nagysebességű PT végbemehet, másrészt a rendezett rendszerekre jellemző, csökkent dimenzionalitás, amely megnöveli annak lehetőségét, hogy „protonhuzalt” formáló H-híd lánc ala-

kulhasson ki. Energetikai oldalról tekintve a legnagyobb nehézséget egyrészt a csökkenő hajtóerő (a proton donor-akceptor párok  $pK_a$  értékei eltérhetnek az optimálistól), másrészt a protonnak a H-híd láncba való belépéséhez szükséges energia jelenti. Természetesen a fehérje szerkezete olyan is lehetne, amelyben a fenti belépési energia minimális (ez valósul meg a  $K^+$  és  $Cl^-$  ionok vezetésére szakosodott csatornafehérjékben), de ilyen protontranszportáló fehérjét még nem írtak le.

A másik gondolat, hogy a PT megértését segítheti, hogy léteznek olyan fehérjék, például a *gramicidín A*, illetve az *aquaporin*, amelyek kiválóan alkalmasak modellszámolásokra. A *gramicidín* a baktérium membránján keresztül csatornát alakít ki, amelyben a protonvezetés a vízmolekulák alkotta H-híd láncon keresztül alacsony energiával valósulhat meg. Az *aquaporin* membránfehérjében kialakult csatornák specifikusan vizet vezetnek, a PT-t pedig gátolják. A vezetési mechanizmusok értelmezésére egymással nehezen összeegyeztethető vélemények alakultak ki. A nagyon szerteágazó munkákból a molekuláris részletek elemzése nélkül annyi közös tapasztalat leszűrhető, hogy a PT kinetikai gátja alacsony, a proton kis aktiválási energiával mozoghat a láncon belül, és a belső helyek betöltöttségét a lapos energiaprofil elősegíti, a deszolvatáció pedig bünteti. A protonvezetés tényleges sebességét ezen energiajárulékok egymáshoz viszonyított aránya határozza meg.

#### *A proton útja a bakteriális RC. fehérjében*

A fotoszintézisnek fényel működtetett elsődleges folyamata a RC-hez kapcsolódó kinont (Q) két elektron és két proton felvételével kinollá ( $QH_2$ ) redukálja. E folyamatban a PT jellemzőinek megállapítását nagyban nehezíti az a tény, hogy hozzá elektrontranszfer (ET) is csatolódik, amelynek leválasztása speciális kísérleti feltételeket (mutá-

ció, kémiai szubsztitúció, ligandumképzés stb.) igényel. A  $H^+$  ionnak nagy, 1,4 nm távolságot kell bejárnia, míg a vizes fázisból a fehérje belsejében (a  $Q_B$  kötőhelyre elrejtett  $Q$ -hoz ér. Útját az ionizálható aminosavak különlegesen sűrű hálózata jelöli ki. Szükség is van ilyen ösvényre, mert a  $Q_B$  hely pozitív elektrosztatikai potenciálja stabilizálja a szemikinin anion ( $Q^-$ ), de nem kedvez az ide irányuló és fiziológiai szempontból hasonlóan fontos  $PT$ -nek. A  $H^+$  ionok irányítatlan mozgása tökéletlen mechanizmus lenne a kinon teljes redukálására.

Mindkét proton a két felszíni hisztidinnel (H126 és H128) és aszparaginsavval (H124) kijelölt kapun lép be, végigfut a közbülső savas oldalláncokon, majd a  $Q_B$ -hez közeli L213 aszparaginsavnál útjuk elágazik: az első az L223 szerinen át, míg a második az L212 glutaminsavon keresztül kerül a kinon  $C_1$ -O, illetve  $C_4$ -O karbonil oxigénjeihez (Paddock et al., 2003). Ezek az aminosavak azonban nem képeznek folytonos protonszállító útvonalat, mert közöttük jelentős szakadások vannak. Ezeket a fehérje oldalláncaitól és a vízmolekulák dinamikájától függően időlegesen vagy a fehérje redoxállapotától, szerkezetétől függően stabilan áthidalhatja vízmolekulák. A  $RC$ -n belüli proton útvonalra tehát nem remélhetünk egyértelmű választ a szerkezet finomabb (statikus) feloldásától, azt mindig kinetikai (a működésre vonatkozó) vizsgálatoknak kell kiegészíteniük.

Néhány szó a  $PT$  időskálájáról. Ha összefüggő a  $H$ -híd, és összetevői között páronként kedvező energetikai viszonyok alakulnak ki ( $\Delta pK = pK_{\text{akceptor}} - pK_{\text{donor}} > 0$ ), akkor a  $PT$  nagyon gyors, sebessége akár  $10^{12} s^{-1}$  is lehet. Az  $RC$ -ben a protonvezetési sebesség ( $10^7 s^{-1}$ ) ugyan kisebb, de még így is igen nagy. Ennek oka, hogy noha a víznek nagyon erős a proton donor potenciálja ( $pK_a \approx -2$ ) és a terminális akceptorok  $pK_a$  értékei nem alacsonyok ( $pK_a(L212Glu/L212Glu-H)$

$\approx 9$  és  $pK_a(Q_B H^-/Q_B H_2) \approx 10,7$ ), (azaz jelentős a hajtóerő), a  $H$ -hidak láncolata csak rövid időre áll össze. Ha pillanatszerűen (fénygerjesztéssel) szemikininot ( $Q^-$ ) hozunk létre, a fehérje a protont a vizes fázisból csak jókora (0,1 ms) időkéssel veszi fel, mert meg kell várnia, hogy a fehérje (protonfelvételre) alkalmas konformációba kerüljön (Maróti – Wraight, 1997). A közismert mondást kissé átalakítva: nem akkor megyünk át a folyón, amikor odaérünk, hanem akkor, amikor a híd elkészül.

#### *A protonok forrása*

A fehérje protonvezetési csatornájába három, egymástól független úton is kerülhetnek protonok a vizes fázisból: szabad  $H^+$  (hidroxónium,  $H_3O^+$ ) ionok diffúziójából, a víz protolíziséből és mozgékony puffer protonjának leadásából. Semleges vagy alkalikus  $pH$  tartományokban ( $pH > 7$ ) a szabad  $H^+$  ion koncentráció ( $[H^+] < 100$  nM) a fehérje koncentrációjánál lényegesen kisebb lehet, és a protonfelvételt határoló tényezővé válhat. Ezt elkerülendő, három, egymással összefüggő mechanizmus (protonantenna, csökkenő helyi  $pH$  és protontartály) működésével bővíülhet a protonok forrása.

Felületi protonálható csoportok érdekes mintázatát figyelték meg számos, protont transzportáló fehérjében (bakteriorodopszin, citokróm  $c$ , citokróm oxidáz), amelyekről feltételezhető, hogy a  $H^+$  ionokat (antenna módjára) hatékonyan begyűjtik az oldatból, és ugyancsak nagyon hatékony felületi vezetéssel a protoncsatorna nyílása felé továbbítják. A felületi vezetést az általában negatív töltésű membránfelületek kiterjeszthetik, illetve erősíthetik. Az elméleti és kísérleti munkák nehezen áttekinthetők, és nem vagyunk arról teljes mértékben meggyőződve, hogy az antenna-funkció minden közölt esetben valóban nagyobb protonfluxust eredményez. Bakteriorodopszinnál felületi karbonsavakat cseréltek ki nemprotonálható aminosavakra,

de a fotociklus (protonpumpa) sebességében egyáltalán nem (vagy csak alig) figyeltek meg csökkenést (Lányi János személyes közlése).

A protoncsatorna nyílásánál a  $H^+$  ion koncentráció az oldatbeli érték fölé növekedhet egyrészt a fehérje negatív felületi potenciálja, másrészt a közeli és így egymással erősen kölcsönható protonálható aminosavak pufférhatása miatt. A kölcsönhatás növeli, és egyben széthúzza az ilyen csoport effektív  $pK_a$  értékét. A nagyobb  $pK_a$  megnöveli a protonhozzáférhetőséget a protoncsatorna számára, azaz helyi protontartályként működik. A széthúzott  $pK_a$  tartomány (a RC H126, H128 és talán H68 hisztidinjeinél ez az érték 5,9-7,4) szélesebbé teszi azt a pH tartományt, ahol a csoport tagjai közül legalább az egyik protonált.

Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy a protonok útja a fehérjék belsejébe a hidrogénhidak képlekeny, a molekula dinami-

kájával összhangban kialakuló rendszerén keresztül vezet. A protonvándorlás irányát és hajtóerejét a fehérje megfelelő csoportjának elektron(felhő)vel való redukálása (például citokróm oxidáz, SOD) vagy fénygerjesztése (ez látásnál a rodopszin, a fotoszintézisnél a klorofill) határozza meg. Hasonlóan ahhoz, mint ahogy az Úr Izrael fiait erős kézzel hozta ki Egyiptomból, és mutatott irányt a vándorlásuk alatt: „Az Úr nappal felhőoszlopban haladt előttük, hogy mutassa az utat, éjjel pedig tűzoszlopban, hogy világítson nekik. Így éjjel-nappal vonulhattak.” (Biblia, Kivonulás könyve, 13, 21)

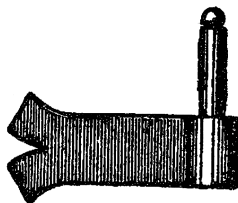
Kulcsszavak: *molekuláris biofizika, proton-transzfer, protonpumpák, fotoszintézis, protonvezetés, fehérje, bakteriorodopszin, hidrogénhid*

Pályázati támogatások: *OTKA TO42680, Balaton F-4/04 és MTA-CNR.*

#### IRODALOM

- Biblia. Ószövetségi és Újszövetségi Szentírás* (1976): Szent István Társulat, Budapest
- Eigen, Manfred (1964): Proton Transfer, Acid-base Catalysis and Enzymatic Hydrolysis. *Angewandte Chemie – International Edition*. **3**, 1–19.
- Maróti Péter – Wraight, Colin A. (1997): Kinetics of  $H^+$  ion Binding by the  $P^+Q_A^-$  State of Bacterial Photosynthetic Reaction Centers: Rate Limitation within the

- Protein. *Biophysical Journal*. **73**, 367–381.
- Paddock, Mark L. – Feher, G. – Okamura, M.Y. (2003): Proton Transfer Pathways and Mechanism in Bacterial Reaction Centers. *FEBS Letters*. **555**, 45–50.
- Sass, Hans Jürgen – Büldt, G. – Gessenich, G. – Hehn, D. – Schlezinger, R. – Berendzen, J. – Ormos P. (2000): Essential Structural Alterations for Proton Translocation in the M State of Wild-type Bacteriorhodopsin. *Nature*. **406** 649–653.



# ÚJ JELENSÉGEK AZ ATOMI FOTOELEKTRONOK SZÖGELŐ- SZLÁSÁBAN

Ricz Sándor

tudományos főmunkatárs, Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete  
ricz@atomki.hu

## Bevezetés

Az olvasó talán kissé meglepődik, hogy milyen új jelenségek lehetnek a fotoelektronok szögeloszlásában, hiszen a fotoelektromos effektus már több mint száz éve ismert. Valóban, a jelenséget 1902-ben Lénárd Fülöp mutatta ki, és az alapvető tulajdonságait is meghatározta. Azt tapasztalta, hogy egy fémlémez fénnyel megvilágítva, abból elektronok lépnek ki (ezeket nevezzük fotoelektronoknak), amelyek intenzitása arányos a fény intenzitásával, és energiája a fény színétől (energiájától) függ. Ezen eredmények is hozzájárultak, hogy 1905-ben a fizikai Nobel-díjat Lénárd Fülöpnek ítelték. A kísérletileg tapasztaltakat Albert Einstein (Einstein, 1905) magyarázta meg, még ugyanebben az évben, Max Planck kvantumhipotézisének segítségével. Eszerint egy  $h\nu$  energiájú foton által keltett elektron energiája

$$E_e = h\nu - I \quad (1)$$

ahol  $E_e$  a kirepülő elektron mozgási energiája, míg  $I$  a mintára jellemző kötési energia. Einstein 1921-ben kapott Nobel-díjának indoklásában kiemelték a „fotoelektromos effektus” törvényének felfedezését. Az első fotoelektron szögeloszlás-mérés Walther Bothe (Bothe, 1924) és C. T. R. [Charles Thomson Rees] Wilson (Wilson, 1923) nevéhez fűző-

dik. Megállapították, hogy a fotoelektronok szögeloszlásának maximuma jó közelítéssel a foton elektromos vektorának irányában található, ami merőleges a foton haladási irányára. Néhány évvel később Gregor Wentzel (Wentzel 1926), Guido Beck (Beck, 1927) és Arnold Sommerfeld (Sommerfeld, 1930) kvantummechanikai számolásai mintegy 10 % pontossággal reprodukálni tudták a kísérletileg megfigyelt szögeloszlásokat.

A hatvanas évek második felétől kezdődően a magfizikai kutatásokhoz kifejlesztett eszközök és módszerek egyre nagyobb mértékben kerültek alkalmazásra a fizika minden területén. Jelentős fellendülés figyelhető meg a fotoionizáció tanulmányozásában is. Olyan kísérleti berendezések jelentek meg, mint a szinkrotronok, melyek segítségével nagy intenzitású polarizált, monokromatikus fotonyalábot lehet előállítani széles fotonenergia tartományban. A különböző típusú elektrostatikus elektronspektrométerek fejlődése lehetővé tette a fotoelektronok különösen jó energiefelbontással történő mérését. Az elmélet oldaláról John C. Tully és munkatársai (Tully et al., 1968) a magfizikában kidolgozott szögkorrelációs formalizmust alkalmazták a fotoelektronok szögeloszlásának leírására. Ez megkönnyítette a kísérleti és elméleti adatok összehasonlítását, valamint szemléletes képet is rendelt a fotoionizációs

folyamat megértéséhez. Attól függően, hogy a hosszúság jellegű mennyiségek milyen hatványkitevővel rendelkeznek a leírásban, beszélhetünk elektromos dipól (erősségét az ún.  $\beta$  paraméterrel jelölik), mágneses dipól és elektromos kvadrupól ( $\gamma$ ,  $\delta$  paraméterek) stb. kölcsönhatásokról, amelyek a klasszikus elektrodinamikából jól ismert dipól, kvadrupól stb. sugárzásoknak megfelelő irányeloszlásokat rendelnek a fotoelektronokhoz.

A hetvenes évek elején François Wuilleumier és Manfred O. Krause (Wuilleumier–Krause, 1974) kísérletileg kimutatták, hogy alacsony fotonenergiák esetén ( $h\nu \leq 1$  keV) az elektromos dipólnál magasabb tagok járuléka elhanyagolható ( $\gamma \approx \delta \approx 0$ ), amit a relativisztikus függetlenrészecske-modell (angol rövidítése RIPM) számolások is alátámasztottak (Bechler – Pratt 1990; Cooper, 1990; Derevienko et al., 1999). A függetlenrészecske-modell az atomok olyan leírása, amelyben a kiszemelt elektron a mag és a többi elektron által keltett átlagos térben mozog, a teret létrehozó részecskék mozgásától függetlenül. Ez a modell, valamint az elektromos dipólnál magasabb rendű tagok elhanyagolhatósága a 90-es évek végéig tartotta magát mind a kísérleti munkákban, mind az elméleti számolásokban. Ezért az összes szögeloszlásmérést az úgynevezett dipólsíkban végezték a polarizációs vektorhoz viszonyított két, maximum három szög alatt (dipólsík: a foton elektromos és impulzusvektora által meghatározott síkra merőleges sík). Így a magasabb rendű járulékokról semmiféle információt nem szolgáltatottak ezek a vizsgálatok.

Az utóbbi években több elméleti munka is megjelent, amelyekben a fotoionizáció leírásában a dipól kölcsönhatás mellett a magasabb multipólusok szerepét is vizsgálják az atomi elektronok kollektív mozgásának figyelembe vételével (Johnson – Cheng, 2001; Gorczyca – Robicheaux, 1999). Ezen számolások jelentős nem-dipól járulékokat jósoltak alacsony

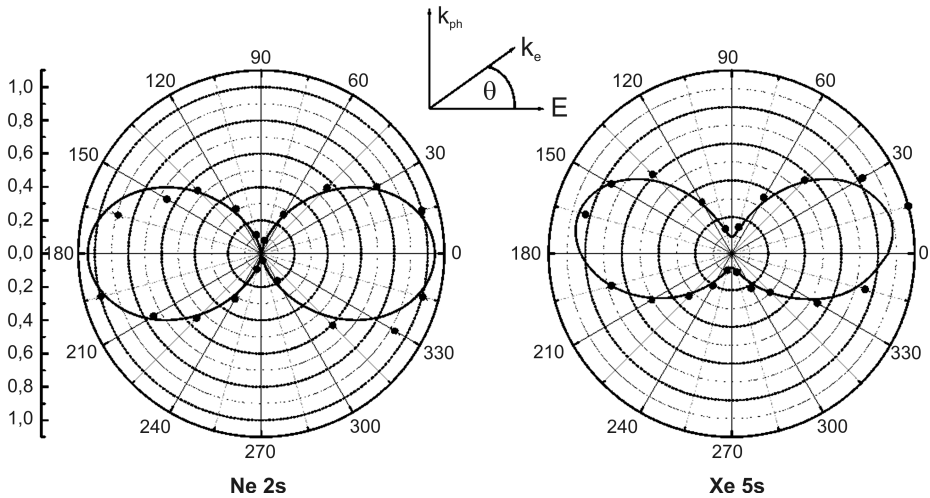
fotonenergiák esetén ( $h\nu \leq 1$  keV). Továbbá a fotoelektronok szögeloszlását leíró paraméterek rezonanciaszerű viselkedést mutatnak egy-egy újabb ionizációs vagy gerjesztési csatorna megnyílásának környezetében, amely az általánosan elfogadott függetlenrészecske-modell alkalmazhatóságának korlátait is mutatja.

Jelen cikkben az ATOMKI-ban kifejlesztett ESA-22 elektronspektrométerrel (Riciz et al., 2002) a lundi Max-II szinkrotronon (Svédország) végzett méréseinkből szeretnénk olyan példákat bemutatni, amelyekben az atom sokrészecskés tulajdonsága fontos szerepet játszik. Kísérleti vizsgálatainkban elsőként mutattunk rá a magasabb multipólusok figyelembevételének fontosságára, a függetlenrészecske-modell pontatlanságára és a különböző ionizációs és gerjesztési csatornák közötti kölcsönhatás nem elhanyagolható voltára fotoionizációban.

### *Eredmények*

A következőkben két olyan vizsgálatot ismertetek, amelyekben a mért és számolt adatok összehasonlításából egyértelműen lehet következtetni az atom sokrészecskés tulajdonságára, valamint a különböző gerjesztési csatornák közötti kölcsönhatás jelentőségére. Méréseinkben a dipól ( $\beta$ ) és nem-dipól ( $\gamma$ ) kölcsönhatás anizotrópia paramétereinek fotonenergiától való függését határoztuk meg. Általában e paraméterek energiafüggése sokkal érzékenyebb az ionizációs folyamat dinamikájára, mint a teljes ionizációs hatáskeresztmetszetek. A fotoelektronok szögeloszlását a foton elektromos és impulzusvektora által meghatározott síkban mértük, hogy az összes anizotrópia-paraméter egyetlen spektrum felvételéből határozhatassuk meg. Az így kapott eloszlások alakjából azonnal következtetni lehet a fotoionizációban jelentős szerepet játszó kölcsönhatások típusára.

Szemléltetésként a *1. ábrán* a neon  $2s$  és a xenon  $5s$  héjairól származó fotoelektronok



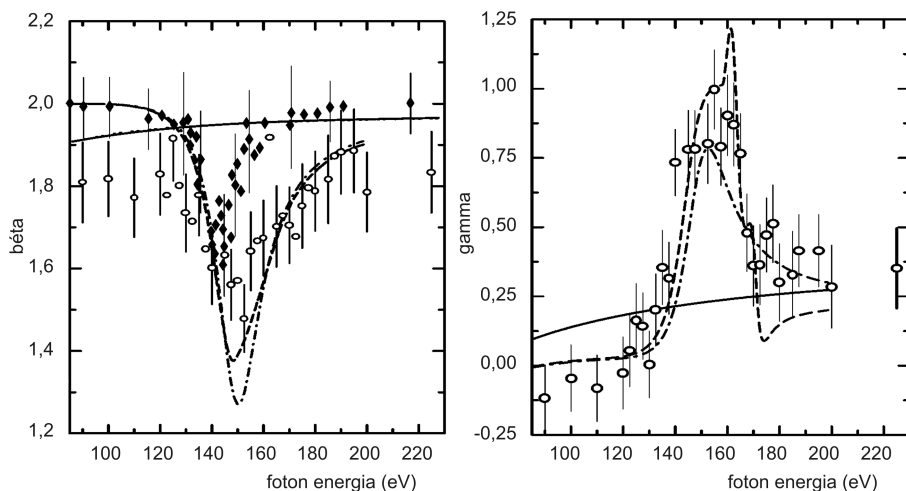
1. ábra • Neon 2s és xenon 5s fotoelektronok szögeloszlása 250, illetve 150 eV foton energián, polárkoordináta rendszerben ábrázolva. A pontok a különböző szögek alatt mért intenzitásokat jelölik, míg a vonal az ezekre illesztett eloszlást mutatja. A középső ábrán a mérési geometria látható, ahol  $k_{ph}$  és  $k_e$  a foton, illetve a fotoelektron impulzusvektora, míg  $E$  a foton elektromos vektora.

szögeloszlását ábrázoltuk. Mint látható, a bal oldali ábra (Ne 2s) a fotonnyaláb irányához képest előre-hátra jó közelítéssel szimmetrikus (fel-le irányban), míg a jobb oldali (Xe 5s) aszimmetrikus. Ez azt jelenti, hogy a neon esetében a nem-dipól jellegű kölcsönhatás elhanyagolható, míg a xenonnál ezek járuléka jelentős. Megjegyezzük, hogy az úgynevezett dipólusokban végzett mérések minden esetben a neonhoz hasonló eloszlást mutatnak, és így csak a tényleges kölcsönhatások egy részéről szolgáltatnak információt.

Először a xenon 5s héjáról származó fotoelektronok szögeloszlását vizsgáltuk (Ricz et al., 2003) a foton energiájának függvényében. Ez a mérés azért érdekes, mert lehetőséget nyújt az irodalomban található kétféle modellszámolás érvényességi körének tesztelésére. A függetlenrészcseke-modellben (Derevienko et al., 1999) végzett és az atomi elektronok kollektív mozgását figyelembe vevő számolások (részletezés nélkül rövidítjük csak RRPA-nak (Johnson–Cheng, 2001) között jelentős eltérések mutatkoztak az anizotrópia-paraméterek energiafüggésére.

Sőt az RRPA-eredmények még attól is függetek, hogy milyen atomi elektronok közötti kölcsönhatást vettek figyelembe. A 2. ábrán látható a kísérleti és az elméleti anizotrópia-paraméterek összehasonlítása. Az általunk mért adatokat körökkel, míg a számoltakat különböző típusú vonalakkal ábrázoltuk. A bal oldali ábrán, a dipól paramétereknél ( $\beta$ ), feltüntettük Oliver A. Hemmers és munkatársai eredményeit is (Hemmers, 2001, rombuszok), amelyek kissé eltérnek a mieinktől (hibás mérés a gyenge energiafelbontás miatt).

Szembevetendő, hogy a függetlenrészcseke-modell (folytonos vonal) teljesen más energiafüggést mutat, mint a kísérlet, mind a béta, mind a gamma anizotrópia-paraméterekre. A mért adatok az RRPA-elmélettel sokkal jobb egyezést mutatnak, vagyis az atomi elektronok közötti kölcsönhatás fontos szerepet játszik. Amikor az RRPA-számolásokban csak két héj szerepel (5s, 5p) nincs érdemi eltérés a két modell között (egybeesik a folytonos vonallal), viszont a következő héj (4d, pont vonal) figyelembevétele már a



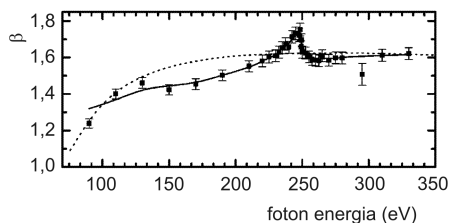
2. ábra • Dipól (béta) és non-dipól (gamma) anizotrópia-paraméterek fotonenergia-függése a Xe 5s fotoelektronokra. Kísérlet: o saját mérés; ♦ Hammers et al. Elmélet: – RIPM (Derevienko et al., 1999); - - - RRPA három atomi héj; - - - RRPA öt atomi héj (Johnson – Cheng, 2001).

kísérleti adatokhoz hasonló szerkezetet produkál. Az összes négyes, ötös héj ( $4s$ ,  $4p$ ,  $4d$ ,  $5s$ ,  $5p$ ) kölcsönhatásával kapott elméleti adatok (szaggatott vonal) a dipól paraméterek ( $\beta$ ) esetén közelebb vannak a mért értékekhez, míg a nem-dipólra ( $\gamma$ ) egy kis romlás figyelhető meg. Ez utóbbi esetben ugyan a kísérleti hibák miatt erős kijelentést nehéz tenni, de megkockáztatjuk, hogy a számolt és a mért energiafüggés alakja közelebb van egymáshoz, ha az abszolút értékük nem is. Az elmondottakhoz hasonló jelenséget figyeltünk meg a Xe  $5p$  fotoelektronok anizotrópia-paramétereinek viselkedésében is, csak a fotonenergától való függés egy kicsit elkentebb (Sankari et al., 2004).

Felvetődik a kérdés, hogy az előzőekben ismertetett jelenség, vagyis az anizotrópia-paraméterekben megfigyelt „hullámlás” csak a xenonra vagy más atomokra is jellemző? Ezt ellenőrizendő, hasonló méréseket végeztünk az argon  $3p$  fotoelektronok szögeloszlás-paramétereinek fotonenergia-függésére is (Riciz et al., 2005). Ez esetben csak függetlenrészecske-modellszámolások álltak rendelkezésünkre.

Így vizsgálatainkat mérsékelt energiafelbontás mellett, széles fotonenergia-tartományon való méréssel kezdtük. A 3. ábra mutatja a kísérleti és elméleti adatok összehasonlítását.

Mint látható, a függetlenrészecske modell jelentős eltérést mutat a mért energiafüggéstől, továbbá a kísérleti adatokban hasonló szerkezet figyelhető meg a 250 eV-es fotonenergia környezetében, mint a xenonnál 150 eV körül. Így arra következtethetünk, hogy a Xe-nél tapasztaltak bármelyik atomnál bekövetkezhetnek valamilyen foton-



3. ábra • Argon  $3p$  fotoelektronok dipól anizotrópia-paraméterének fotonenergia-függése. ■ kísérleti adatok (a folytonos vonal csak a szem vezetésére szolgál); pontozott vonal RIPM számolás (Derevienko et al., 1999).

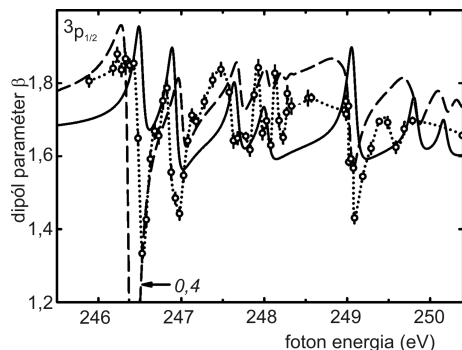


energiánál. Az ábrán ugyan nem látszik jól, de 250 eV környékén még egy finomszerkezet is megfigyelhető, amelyre ezen mérések alapján nem találtunk magyarázatot.

Ezért megismételtük a méréseket, keskeny energiatarományban, olyan módon, hogy nagymértékben növeltük mind a fotonnyaláb, mind az elektronspektrométer energiafelbontását. A 4. ábrán a vizsgálatok eredménye látható a  $3p_{1/2}$  alhéj dipól paraméterére, összehasonlítva olyan elméleti adatokkal, amelyek a direkt és indirekt ionizációs folyamatok közötti kölcsönhatást is tartalmazzák. Folytonos vonallal a saját, míg szaggatott vonallal az irodalomból vett számolásokat ábrázoltuk. A két közelítés közti eltérés az alkalmazott modelltől és a figyelembe vett indirekt ionizációs csatornák számából ered. Megállapíthatjuk, hogy a kísérleti és elméleti fotonenergia-függés nagy vonalakban hasonló, bár a részletekben jelentős eltérések is tapasztalhatók. A mért és számolt adatok közötti eltérések nem cáfolják azt a következtetést, hogy a direkt ionizáció mellett az indirekt ionizációs folyamat is jelentős szerepet játszik, és az ezek közötti interferencia eredménye az argon  $3p$  fotoelektronok dipól paramétereinél megfigyelt finomszerkezet. Ugyanez mondható el  $3p_{3/2}$  alhéj esetében is, amit helyhiány miatt nem ábrázoltam.

Összefoglalva: bizonyos fotonenergiákon az atomi elektronok közötti kölcsönhatásokon kívül a direkt és indirekt fotoionizációs folyamatok interferenciája is jelentősen módosíthatja a fotoelektronok szögeloszlását. A megfigyelt effektusok nemcsak az argon- és a xenonatomokra jellemzőek, hanem sokkal általánosabbak, minden atom, molekula és szilárd minta fotoionizációjánál bekövetkezhetnek.

Felvetődik a kérdés, hogy molekulák és szilárd anyagok esetén a szomszédos atomok jelenléte hogyan módosítja az elmondottakat. Érdeemes lenne a kutatásokat ebbe az irány-



4. ábra • Ar  $3p_{1/2}$  fotoelektronok dipól paraméterének finom szerkezete jó energiafelbontás esetén. Kísérlet:  $\bullet$  (pontozott vonal a szem vezetésére szolgál). Elmélet: folytonos (Ricz et al., 2005) és szaggatott vonal (Gorczyca – Robicheaux, 1999).

ba is kiterjeszteni. Annál is inkább, mivel a fotoelektron spektroszkópiát széles körben alkalmazzák kémiai analízisre, valamint szilárd felületek vizsgálatára is. A mért adatokat, a függetlenrészecske-modell alapján, a nem-dipól, és a különböző ionizációs és gerjesztési csatornák közötti kölcsönhatás elhanyagolásával értelmezzük. Végül megjegyzem, hogy a korábbiaktól eltérő mérőrendszer megépítése, a megszokottól eltérő kísérleti geometria alkalmazása új megvilágításba helyezi ismereteinket, lehetőséget biztosít olyan elképzelések, modellek kísérleti ellenőrzésére, amire korábban nem volt lehetőség. Ez nemcsak az alapkutatások szempontjából fontos, hanem az alkalmazások területén is jelentősen növelheti a levont következtetések megbízhatóságát.

#### Köszönethyilvánítás

Mindenekelőtt köszönettel tartozom munkatársaimnak a fenti vizsgálatokban való alkotó részvételükért, hiszen nélkülük ez a munka nem jöhetett volna létre (névsor szerint az ATOMKI-ból: Kövér Ákos, Molnár József, Ricsóka Ticia, Varga Dezső, az Oului Egyetem Elektronspektroszkópiai Osztálya-

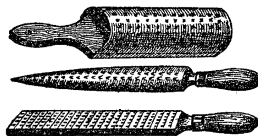
ról, Finnország: Helena Aksela, Seppo Aksela, Marko Jurvansuu, Juha Nikkinen, Rami Sankari). Hálásak vagyunk a lundi Max-lab, (Svédország) munkatársainak a kiváló mérési feltételek biztosításáért. Köszönet illeti az

OTKA-t a munkánkhoz nyújtott támogatásért (T037203).

Kulcsszavak: *fotoeffektus, fotoelektron, dipól kölcsönhatás, nem-dipól kölcsönhatás*

#### IRODALOM

- Bechler, Adam – Pratt, R. H. (1990): Higher Multipole and Retardation Corrections to the Dipole Angular Distributions of L-Shell Photoelectrons Ejected by Polarized Photons. *Physical Review A*. **42**, 6400–6413.
- Beck, Guido (1927): Zur Theorie des Photoeffekts. *Zeitschrift für Physik*. **41**, 443–452.
- Bothe, Walther (1924): Die Emissionsrichtung durch Röntgenstrahlen Ausgelöster Photoelektronen. *Zeitschrift für Physik*. **26**, 59–73.
- Cooper, John W. (1990): Multipole Corrections to the Angular Distribution of Photoelectrons at Low Energies. *Physical Review A*. **42**, 6942–6945.
- Derevienko, Andrei et al. (1999): Non-dipole Effects in Photoelectron Angular Distributions for Rare Gas Atoms. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. **73**, 153–211.
- Einstein, Albert (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*. **17**, 132–148.
- Gorzycza, Thomas Ward – Robicheaux, Francis (1999): Auger Decay of the Photoexcited  $2p^1n_l$  Rydberg Series in Argon. *Physical Review A*. **60**, 1216–1225.
- Hemmers, Oliver A. et al., (2001): Relativistic Effects On Interchannel Coupling in Atomic Photoionization: the Photoelectron Angular Distribution of Xe 5s. *Physical Review A*. **64**, 022507-3.
- Johnson, Walter R. – Cheng, K. T. (2001): Strong Nondipole Effects in Low-Energy Photoionization of the 5s and 5p Subshells of Xenon. *Physical Review A*. **63**, 022504-4.
- Ricz Sándor et al., (2002): High-Resolution Photoelectron–Auger-Electron Coincidence Study for the L23-M23M23 Transitions of Argon. *Physical Review A*. **65**, 042707-7.
- Ricz Sándor et al., (2003): Strong Nondipole Effect Created by Multielectron Correlation in 5s Photoionization of Xenon. *Physical Review A*. **67**, 012712-4.
- Ricz Sándor et al., (2005): Interference Effects in the Angular Distribution of Ar 3p Photoelectrons Across the  $2p\backslash Ns/Md$  Resonances. *Physical Review A*. **72**, 014701-4.
- Sankari, Rami et al. (2004): Angular Distribution of Xe 5p Spin-Orbit Components At 100–200-Ev Photon Energies. *Physical Review A*. **69**, 012707-4.
- Sommerfeld, Arnold *Atombau Und Spektrallinien*, 1930, *Wellenmechanisches Ergänzungsband* 207. O.
- Tully, John C. et al. (1968): Angular Distribution of Molecular Photoelectrons, *Physical Review*. **176**, 95–105.
- Wentzel, Gregor (1926): *Zur Theorie Des Photoelektrischen Effekts*, *Zeits. F. Phys.* **40**, 574–589.
- Wilson, C. T. R. (1923): *Investigations On X-Rays and  $\dot{A}$ -Rays by the Cloud Method, Part I. X-Rays*, *Proc. Roy. Soc.* **104**, 1–24.
- Wuilleumier, François – Krause, Manfred O. (1974): *Photoionization of Neon Between 100 and 2000 Ev: Single and Multiple Processes, Angular Distributions, and Subshell Cross Sections*. *Phys. Rev.* **10**, 242–258.



# ÚTBAN AZ ÓRIÁSMOLEKULÁK FELÉ: „LINEÁRISAN SKÁLÁZÓDÓ” ELMÉLETI KÉMIAI MÓDSZEREK

Surján Péter

az MTA doktora, Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézet Elméleti Kémia Tanszék  
surjan@chem.elte.hu

*Az elméleti kémia legújabb eredményei lehetővé tehetik, hogy hamarosan a soha nem álmódott méretű molekulák szerkezete puszta számítások révén is felderíthető legyen. Szenvedélyesebben szólva: a szemünk láttára épül egy híd a tudományban a fizikától a kémián át az anyagtudományig és a molekuláris biológiáig.*

Az igazán bonyolult anyagi rendszerek, amelyekkel az anyagtudományban, a makromolekulák világában vagy éppenséggel a biológiában találkozunk, nem érthetők meg kizárólag kísérleti és műszeres technikák alkalmazásával. Az empirikus eredmények értelmezéséhez és kiegészítéséhez megbízható számításokra lenne szükség, ezek azonban nagy rendszerekre bajosan kivitelezhetőek.

Szent-Györgyi Albert mesélte egy interjúban, hogy egyszer fizikusokhoz fordult egy molekuláris biológiai jellegű kérdéssel. Amikor a fizikusok megtudták, hogy az öt érdeklő rendszerben kettőnél több elektron van, reménytelennek nyilvánították a probléma megoldását.

Ez a XX. század közepén történhetett, és a szigorú fizikai elveken alapuló elméleti kémia hatalmas utat járt be azóta. Számos egyszerű, néhány atomos molekulára (víz, széndioxid, ózon – hogy csak a legdivatosabbakat említsük) ma már elméleti úton a legpontosabb kísérletekkel vetekedő,

esetenként azoknál pontosabb kijelentéseket lehet tenni.<sup>1</sup>

Mégis sok gyakorlati vegyész kutató mind a mai napig bizonyos szkepticizmussal tekint az elméleti kémiára. Ez a kritika azért jogos, mert a standard elméleti módszerek még manapság is csak kis molekulákra használhatók, így távol maradnak az anyagtudomány és a molekuláris biológia frontvonalaiban zajló kutatásoktól.

Hogy lehet az, hogy ma, amikor a számítógépek rohamos fejlődésének vagyunk tanúi, számítástechnikai okokból egyáltalán gondot okozhat egy nagyobb molekula szerkezetének megértése?

A probléma gyökere a standard elméleti módszerek munkaigényének „skálázódásában” rejlik. Ezen azt értjük, hogy a számításgény hogyan, milyen hatvánnyal függ a vizsgált rendszer méretétől. Sajnos az a helyzet, hogy egy többé-kevésbé megbízható kvantumkémiai módszer munkaigénye a molekula méretének 6. hatványával arányos, de a legegyszerűbb módszerek is a 3. hatványtól függenek.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Az egyik első, kísérleti eredményeket revidáló elméleti eredményt a Nobel-díjas Gerhard Herzberg idézi, aki a saját mérési eredményeit volt kénytelen helyesbíteni később napvilágot látott számítások (Kolos – Wolniewicz, 1968) miatt. Ezt az elméleti sikersztorit Herzberg annyira lényegesnek minősítette, hogy erről tartotta székfoglaló előadását a Pápai Tudományos Akadémián is (Herzberg, 1971).

A kvantumkémia két irányban indult el, hogy ezen a súlyos skálázódási problémán segíteni próbáljon. Az első ötlet az volt, hogy mondjunk le a pontos számításokról, és vezessünk be olyan közelítéseket, amelyek révén a számítási idő megfelelően lecsökken. Ez az ötlet néha bevált ugyan, de az általános problémát két okból nem oldotta meg: egyrészt a közelítések hamar pontatlanná váltak, másrészt a legdrasztikusabb közelítésekkel sem lehetett a hatványfüggést 2-3 alá szorítani.

Ezért került előtérbe napjainkban egy teljesen új számítási filozófia, amely az elméleti apparátus átalakításával ambiciózus módon egyenesen arra törekszik, hogy a számítások munkaigénye a rendszer méretének csupán első hatványától függjön, azaz a számítás-igény arányos legyen a mérettel.<sup>2</sup> Mindezt úgy kell elérni, hogy a számítás pontossága ne csökkenjen. Az ilyen típusú eljárásokat nevezik „lineárisan skálázódó” módszereknek.

A lineárisan skálázódó módszerek elvi alapjainak megértéséhez matematikai ismeretekre van szükség. Megpróbálhatjuk azonban egy egyszerű hasonlattal szemléltetni, hogy milyen fajta ötletek segítenek ilyen módszerek kidolgozásához. Tegyük fel, hogy egy moziállalat a mozitermeiben lévő székeket meg akarja számoltatni, és az a kérdés, hogy mennyi számlálási munkát kell ehhez elvégezni az egyforma arányú, de más-más méretű, téglalap alakú mozitermek

nagyságának függvényében. Mivel a termék hossza és széle arányos, egy kétszer, háromszor hosszabb teremben négyszer, kilencszer annyi szék lesz. Ha most naív módszerrel egyenként számláljuk a székeket, azt találjuk, hogy a megszámlálásukhoz szükséges idő a székek számával, azaz a terem hosszának négyzetével arányos. Ez nagyon előnytelen dolog, mert egy ötször akkora moziteremben  $5 \times 5 = 25$ -ször több időre van szükségünk, hogy az összes széket megszámláljuk.

A végeredményhez természetesen nincs erre szükség. Elég ugyanis megszámlálni a széksorok és az székoszlopok számát (ehhez csak a terem hosszával arányos időre van szükségünk), majd ezt a két számot egyszerűen összeszorozzuk, s máris megvan a pontos eredmény. Egyetlen plusz szorzás árán „lineárisan skálázódó” módszert kaptunk a székek pontos megszámlálására.

Mint minden hasonlat, ez is sántít egy kicsit, hiszen a fenti ötlet alighanem egy iskolás gyereknek is hamar eszébe jut, míg az elméleti kémia lineárisan skálázódó módszerei igencsak kifinomultak. Mégis, jól látszik, hogy az ilyen eljárások kidolgozásához valamiféle szemléletváltásra, s néhány jó ötletre van szükség. Azt is mutatja a hasonlat, hogy a lineáris skálázódás elérése érdekében valami pluszmunkát kell befektetni: példánkban a sorok és oszlopok számának összeszorozását. Egy hatéves kisgyerek például, aki már ismeri a számokat, de még nem tud szorozni, kénytelen lenne a lassúbb, négyzetesen skálázódó, egyszerű leszámlálással működő eljárást választani, ha kíváncsi volna a székek számára. Ez a kvantumkémiaiban is így van: a lineárisan skálázódó módszerek sokszor bonyolultabbak a hagyományosnál, és végrehajtásuk során bizonyos többletmunkát követelnek. Ezért azután kis molekulákra nem is előnyös használni őket, csak olyan nagyokra, ahol a többletmunka már kifizetődik.

A következőkben bemutatunk egy, a laboratóriumunkban nemrégiben kifejlesztett

<sup>2</sup> Egy számpéldát idézünk annak megvilágítására, hogy mekkora bajt is jelent ez. Tegyük fel, hogy elvégeztünk egy számítást egy molekulára, amelyhez mondjuk tíz órán át kellett pörgetnünk a számítógépet. Ha most egy kétszer akkora molekulát szeretnénk megérteni, akkor ehhez  $2^6 \times 10 = 640$  óra, tehát csaknem egy hónap számítási idő kellene. Egy ötször akkora molekulához pedig több mint tizenöt év! Megfordítva, ha tudnánk is egy tízszer gyorsabb számítógépet vásárolni, azon mindössze  $\sqrt[6]{10} = 1,47$ -szer nagyobb molekulára tudnánk ugyanannyi idő alatt ugyanolyan számítást végezni.

<sup>3</sup> Részletesen: egy kétszer akkora molekulához csak kétszer annyi időre legyen szükség – ennyi munka talán még tolerálható...

lineárisan skálázódó eljárást (Kóhalmi et al., 2005) molekulák elektronszerkezetének meghatározására. Ismeretes, hogy a kvantumelmélet szerint egy molekula lehetséges energianívóit a molekula energiamátrixának sajátértékei határozzák meg. Ha ezeket a sajátértékeket a hagyományos matematikai eljárásokkal kívánjuk kiszámítani, az elvégzendő számítási munka a mátrix méretének köbével arányos. Ha a sajátértékek megvannak, a molekula energiája – a legegyszerűbb (ún. Hückel-) modellben – az elektronok által elfoglalt nívókhoz tartozó sajátértékek összegeként adódik. A számítástechnika mai fejlettsége mellett egy jó minőségű átlagos személyi számítógépen egy kb. 5000 atomos molekula elektronszerkezetét lehet ily módon néhány óra alatt felderíteni.

Az E energiát ugyanakkor nemcsak a sajátértékek összegeként kaphatjuk meg, de az energiamátrix (H) és az ún. sűrűségmátrix (P) elemeinek összeszorozásával is:

$$E = SpHP,$$

ahol Sp a mátrix spúrképzést (a diagonális elemek összegzését) jelenti. Ha M-atomos rendszert vizsgálunk, ezek a mátrixok M x M számot tartalmaznak, tehát az energia kiszámítása négyzetesen skálázódó feladatnak tűnik. A valóságban azonban a H, és sokszor a P mátrix igencsak ritka: csak kevés eleme különbözik 0-tól. Ezért a fenti mátrixszorzás műveletigénye csak lineárisan nő a molekula méretével – ehhez mindössze annyit kell tenni, hogy nem a standard mátrixszorzó eljárásokat, hanem az ún. „ritka mátrix technológiát” (Pissanetzky, 1984) alkalmazzuk.

Kérdés azonban, hogy honnan kapjuk a P sűrűségmátrixot? A hagyományos eljárás után a H energiamátrix sajátérték-problémájának megoldása után, egy köbösen skálázódó algoritmussal kaphatjuk meg a (szimmetrikus) P mátrixot, amelynek matematikai tulajdonságai a legegyszerűbb

esetben egy N elektrontól álló rendszerre így adhatók meg:

$$P^2 = P$$

(idempotencia), és

$$SpP = N,$$

azaz a sűrűségmátrix diagonális elemeinek összege megadja az N elektronszámot.

A P mátrix azonban nemcsak a sajátérték problémán keresztül határozható meg. Ismert, hogy fennáll a következő egyenlőség is:

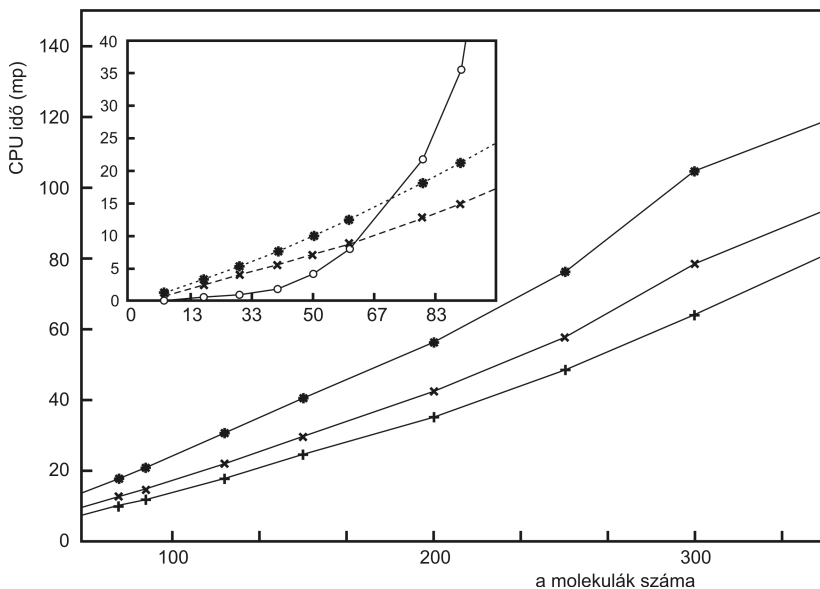
$$HP = PH,$$

tehát az egzakt P mátrix felcserélhető az energiamátrixszal. Rége óta kerestek olyan eljárást, amely közvetlenül a fenti egyenletek segítségével, a drága sajátérték probléma megoldása nélkül szolgáltatná a P mátrixot. A fenti egyenletek közvetlen megoldása reménytelen ugyan, de a jó P mátrix megkapható az alábbi iterációs eljárással:

$$P_{i+1} = P_i + c P_i H (1 - P_i),$$

amelyről kimutatható, hogy az iteráció során megőrzi a P mátrix idempotenciáját is, és a diagonális elemeinek összegét is. Ebben a képletben c tetszőleges szám, amelynek alkalmas megválasztásával az iteráció gyorsítható. A P mátrix szimmetrikusságának a fenti képlet által előre vetített sérülése egy további trükkel kiküszöbölhető. Látjuk, hogy a formula alkalmazásához csupán egyszerű mátrixszorzásra van szükség, ami ritkamátrixos technológiát alkalmazva lineárisan skálázódó művelet.

A fenti képletek, mint írtuk, a legegyszerűbb (Hückel-) esetre vonatkoznak. Segítségükkel több tízezer atom problémája is rutinszerűen tárgyalható. Az igényesebb, *ab initio* egyelektron-modellek esetében az egyenletek kissé módosulnak, de lényegük változatlan marad. A mellékelt ábrán bemutatjuk egy max. 350 vízmolekulából álló, hidrogénkötésekkel összetartott láncra végzett



1. ábra

*ab initio* számítás időigényének függését a molekulák számától. Pontosabban, csak a P mátrix megkeresésére fordított időt tüntettük fel a hagyományos, köbösen skálázódó, valamint a fent ismertetett iteratív eljárás esetében. Az utóbbi linearitása szembeötlő. (A számítások egy 64 bites személyi számítógépen történtek).

Az itt bemutatott példa csupán egy a manapság górcső alá vont lehetőségek közül (lásd például Kenoufi és Polónyi, 2004). Azt, hogy melyik eljárás lesz a legjobb, és végül is mikor érjük el a felvezetésben

vázolt célt, hogy makromolekulákra is tudunk prediktív erejű kijelentéseket tenni, még nem látjuk pontosan, de annyi bizonyos, hogy évtizedekben mérhető kutatási ráfordításra van még szükség. Mégis, hallatlanul izgalmas kalandról van szó, ami talán végleg összekapcsol majd olyan tudományterületeket, mint a fizika, a kémia és a biológia.

*Kulcsszavak: makromolekulák, kvantumkémia, skálázás, anyagtudomány, fizika, biológia, kémia*

#### IRODALOM

- Herzberg, Gerhard (1972): Experimental Tests of the Quantum Theory of Molecular Hydrogen. *Commentarii Pontificae Academiae Scientiarum*, **II**, 49, 1.
- Kenoufi, Abdelouahab – Polónyi János (2004): Projection Method for Rapid *Ab Initio* Calculations of Metals. *Physical Review B*, **70**, 205105.
- Kolos, Włodzimierz – Wolniewicz, Lutosław (1968): Improved Theoretical Ground-State Energy of the

Hydrogen Molecule. *Journal of Chemical Physics*, **49**, 404–410.

Kőhalmi Dóra – Szabados Ágnes – Surján Péter (2005): Idempotency-conserving Iteration Scheme for the One-Electron Density Matrix. *Physical Review Letters*, **95**, 13002.

Pissanetzky, Sergio (1984): *Sparse Matrix Technology*. Academic Press, London

## ÚRKUTATÁS – ŰRTEVÉKENYSÉG – ŰRFIZIKA

Szegő Károly

a fizikai tudomány doktora, tudományos tanácsadó  
MTA KFKI Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézet – szego@rmki.kfki.hu

E cikkben először összefoglalom azokat a tudománypolitikai kereteket, amelyek meghatározzák Európában az űrfizika sorsát, az új keretprogram lehetőségeit. Ezután röviden bemutatom a hazai űrfizika kialakulását és felvillantom a jelenlegi tevékenység palettáját. Végül e terület perspektíváiról lesz szó.

Akik az utóbbi időben olvasták a 7. Keretprogram prioritásait, talán csodálkozással vették észre, hogy a tíz kiemelt terület között megjelent a *Space*, azaz a *Világűr*. Ez azért is meglepő lehet, mert korábban a keretprogram egyik fontos elve volt, hogy nem támogat olyan tevékenységeket, amelyekre az Európai Unió tagországai külön nemzetközi szervezetet hoztak létre (az Európai Űrügynökséget – ESA), és annak pénzügyi kereteit az illetékes miniszterek az EU büdzséjétől elkülönítve hagyják jóvá. Azóta azonban „sok víz folyt le a Dunán”, stílszerűbben „sok anyag áramlott ki a Napból”, s ez a korábbi elvek módosítását tette szükségessé, felismerve, hogy az űrtevékenység napjaink egyik meghatározó kulcstechnológiája lett.

A keretprogram száraz brüsszeli stílusban határozza meg e prioritás célját: „Az európai űrprogramok támogatása olyan alkalmazásokra koncentrálva, mint például a Föld globális monitorozása (GEMS) a célból, hogy elősegítse az állampolgárok hasznát és az európai űrpar versenyképességét. A program hozzájárul az európai űrpolitika fejlesztéséhez, kiegészíti a tagországok és más fontos szereplők hozzájárulásait, beleértve az Európai Űrügynökséget.”

Ismét megjelent egy új szó: az európai űrpolitika. Ez korábban nem volt. Néhány éve azonban, felismerve e terület jelentőségét, a Bizottság és az ESA tárgyalásokat kezdett, hogyan lehetne megerősíteni Európa szerepét, hogyan lehetne jobban kihasználni a gazdasági lehetőségeket, koncentrálni a kutatási erőfeszítéseket. E tárgyalások eredménye az új európai űrpolitika. Mind a mai napig a fejlett európai országok, ESA-tagságuk mellett, erős nemzeti űrügynökségeket működtetnek, független programokkal a nemzeti érdekeknek megfelelően. Az ESA ehhez háttérrel biztosított, de az ESA és a nemzeti ügynökségek együttműködése sohasem volt felhőtlen. Úgy tűnik, e modell felett eljárat az idő.

Kihatott az európai űrprogram alakulására a nemzetközi kapcsolatrendszer változása is. Korábban Európa és Amerika között jó volt az együttműködés e területen, bár sohasem nélkülözötte ez a versengést, és gyakran alakultak ki súlyos nézeteltérések a közös programok során, hiszen a NASA éves költségvetéssel gazdálkodva, gyakran kényszerült a távlatos tervekben megfogalmazottak áthágására, egyes programok finanszírozásának leállítására. Új helyzetet teremtett azonban az is, hogy az Egyesült Államok 1992-ben a nemzetközi terrorizmus növekedése, de más okok miatt is, újraszabályozta a nemzetközi kereskedelmét (International Traffic in Arms Regulations – ITAR). Ennek eredményeképp számos űrtechnológiai eljárást, egyes elektronikai alkatrészeket ma már

Európának sem ad át, ezért Európának ki kell fejlesztenie a saját technikáját; ez az eddigieknél nagyobb ráfordítást igényel. Példa erre az európai globális helymeghatározó rendszer kifejlesztése (GALILEO program), 20 Md eurót meghaladó költséggel, a kormányok és a magánszféra közös finanszírozásában.

Az űrtechnika meg csak fejlődött, fejlődött. Ma nem létezhet enélkül távközlés, közlekedés, de biztonság sem. Találkozik vele az EU-támogatást kérő mezőgazdász, a környezetvédelmi kérdéseket vizsgálók, a globális éghajlat változásával foglalkozók, és hosszú a lista. A technológia fejlődését sok esetben a miniatürizálás motiválja. Az egyik nemrég felőtt űrszonda fedélzetén működik egy kémiai összetételt analizáló berendezés. Semmi nehézség nincs abban, hogy a Földön egy ilyen rendszer egy szobányi helyen működjön. Ugyanezt néhány liter térfogatban, néhány kiló súllyal megvalósítani nem volt kis teljesítmény.

A jelenlegi európai űrpolitikában az EU elsősorban a technikai kérdésekre koncentrálnak, a kutatás továbbra is az ESA feladata marad. Ezt tükrözik a keretprogram Space-re vonatkozó fő feladatai:

- Űrben működő eszközökre alapozva alkalmazások fejlesztése az európai társadalom szolgálatára
- Fejlesztések az űrtechnika alapjainak megerősítésére
- Kutatási és fejlesztési támogatás annak érdekében, hogy az ESA és a nemzeti ügynökségek együttműködése eredményesebb legyen az űr megismerése terén, a tudományos adatokhoz való hozzáférés megkönnyítése

Sok pénz ebből kutatásra nem lesz.

Az űrkutatás drága; összehangolt tevékenységet igényel a rakétatechnika, pályaszámítás, kommunikáció, magának az űrszondának elkészítése, felműszerezése, az adatok megőrzése és tárolása. Az összehangolt földi

és égi tevékenység együttesen az űrmisszió, ennek egy eleme maga a méréseket végző egység, az űrszonda. Egy misszió időtartama tizenöt–húsz év, költsége ritkán kevesebb, mint 500 millió €, de a nagyobbak költsége több milliárd. Nyilvánvaló, hogy egy misszió céljainak a kiválasztása is összetett feladat, és folyamatos technikai fejlesztéseket igényel. E fejlesztésekre koncentrálnak majd többek között a keretprogram. Speciális fejlesztések kellenek például az energiaellátás terén, ha távoli vidékeket akarunk kutatni, a hővédelem, hőállóság tekintetében, ha közel akarunk menni a Naphoz, a miniatürizálás tekintetében stb.

A kutatási célok a műszaki lehetőségekre építve, széleskörű nemzetközi diszkusszió során alakulnak ki, koncepciók, tervtanulmányok készülnek, majd a finanszírozó szervezetek tudományos tanácsai döntenek. Ezután nemzetközi pályázatot írnak ki a műszerek elkészítésére; a nyertesek lesznek a misszió tudományos programjának résztvevői.

És hogyan kerültek mindebbe a magyarok? Nem kétséges, hogy ebben az egykori Interkozmosz együttműködés segített. Akkoriban egyértelműen szükség volt a magyar műszaki, elektronikai mérnöki tudásra, és ez megnyitotta a fizikusok számára is ezt a kutatási területet. Az orosz űrfizikusok pedig nagyon jók voltak. Az egykori Landau-iskola emlőin nevelkedett elméleti plazmafizikusok a szakma legjobbjai közé tartoztak. Ezt ma sokkal egyértelműbben lehet állítani, mint akkor, amikor még kevésbé láttuk át a teljes nemzetközi szakterületet. Ez az együttműködés hozta magával, hogy a hazai űrfizika két területtel kezdett foglalkozni: a Naprendszer kis testjeinek (üstökösök, holdak) és a Naprendszer híg, töltött anyagának vizsgálatával. A fizikusok és a mérnökök mindig szorosan együtt dolgoztak, mert adathoz csak az jutott, aki a mérőberendezések létrehozásában is részt vett; ez mind a mai napig így van. Ennek objektív alapja az, hogy a mérési adatok kiértékeléséhez itt alapvetően szüksé-



ges a berendezés alapos ismerete, hiszen az űrbeli körülmények között a mérés speciális feltételek között zajlik. (Ennek következménye, hogy igazán érdekes publikációkban sok a társszerző; a berendezést készítő vezető kutató például mindig társszerző, ez „hitelesíti”, hogy a mérési eredmények hihetőek, és helyesen használták őket, meggondolatlanul elfelejtkezve a magyar független hivatkozások szabályairól.) Az Interkozmosz-munkák azért jelentettek jó ugródeszkát, mert az „űrszakmába” az kerül be, aki már bizonyított, aki jól és határidőre teljesít, érti és betartja a csapatmunka szabályait.

A missziók hosszú átfutása miatt egyszerre több programban kell részt venni, mert különben nincs publikáció. Jelenleg például a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet munkatársai részt vesznek

- az ESA és NASA közös Ulysses nevű missziójában, amelynek célja a Naprendszer háromdimenziós szerkezetének vizsgálata (ez eddig az első és egyetlen űrszonda, amely jelentősen el tudott távolodni az ekliptika síkjától);
- az ESA SOHO napkutató obszervatórium egyik részecskeanalizátorának méréseiben;
- az ESA CLUSTER missziójában, amely először tudja négy szonda egyidejű méréseinek segítségével szétválasztani a Föld körüli térség bonyolult plazmajelenségeit;
- a NASA Cassini missziójában, amely a Szaturnusz térségének vizsgálatát végzi;
- az ESA Rosetta üstökös-kutató missziójában, a szonda már úton van, és 2015-ben éri el célját, a Csurjumov-Geraszimenko üstökösöt.
- a már szintén elindított Vénusz Expressz misszióban.

Részt vesznek olyan missziókban, amelyek eszközeit most építik:

- a NASA Stereo missziójában, amely több szondával fogja a Nap „sztereoképét” vizsgálni,

- az ESA Bepi-Colombo missziójában, amely a Merkúrt vizsgálja majd.

És noha ez egyetlen fizikai témának, a Nap és a bolygók kölcsönhatásának vizsgálatát jelenti, már megint statisztikailag, kutatóként sok témát merünk űzni. (A tudománypolitikai állításokat, kritikákat leírók gyakorta aligha tudják, miről is beszélnek. És ha ez csak erre az egy dologra lenne igaz...)

Nem kétséges, hogy az űrkutatás jellege miatt minden eredmény egyedi, világselő, hiszen vagy még nem járt arra senki, vagy sokkal korábbi mérés technikával tudtak csak mérni. (A mi tévékameránk hozta le először például a Halley üstökös magjának képét, mert Kepler űr csacska törvényei miatt a Giotto szonda egy héttel később ért oda. Igaz viszont, hogy nekik már könnyebb volt értelmezni, mit is láttak.)

Ezért az eredmények közötti válogatás csak szubjektív lehet. Ezt előrebocsátva, azt gondolom, hogy a Halley üstökös kutatása során igen jelentős eredményeket értünk el. Nemcsak a mag fizikai paramétereit határoztuk meg, hanem az egyik első működési modellt is sikerült megalkotnunk. Új részecskegyorsítási mechanizmust találtunk (egy olyan magyar műszerrel, amit nem is akartak a fedélzetre felrakni, hiszen az akkori tudás szerint nem mér majd újat.) A Vénusz térségének vizsgálata, például az éjszakai ionoszféra működésének megértése is jelentős eredmény volt. A mostani mérések közül talán a Szaturnusz körüli eredményeinket érdemes kiemelni (ezek most vannak publikálás alatt). Újdonság, hogy víz, víz és víz (és oxigén) van mindenütt, ez szabadul fel a gyűrűkből, a jeges holdakból, ez uralja a Titán környékének anyagát. A korábban ott járt Voyager szonda ezt nem fedezte fel. A Szaturnusz forgásának hatását plazmakörnyezetére csak most kezdjük megérteni.

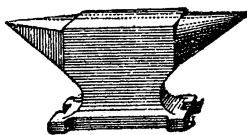
Illetlenség lenne azt sugallni, hogy csak a KFKI RMKI-ban foglalkoznak űrkutatással, bár talán nem szerénytelenség azt állítani,

hogyan mi vagyunk a zászlóshajó. Sok elismerést hozott a KFKI Atomenergia Kutatóintézet mérnökeinek műszerépítő tevékenysége, fedélzeti műszereket készítenek az ELTE Geofizikai Tanszékén és a BME Mikrohullámú Híradástechnikai Tanszékén is. Noha nem készítenek fedélzeti műszereket, jelentős a soproni MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, a Konkoly Observatórium munkája. Foglalkoznak az e területhez tartozó kutatási feladatokkal a Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetben, a debreceni Atommagkutató Intézetben is. Sajnos, minden eredményről nem lehet egy ilyen rövid cikkben beszámolni. A Fizikai Osztályhoz nem tartozó szervezeteknek még a felsorolása is elmarad. A hazai űrtevékenység irányítását az IHM felügyelete alatt működő Magyar Űrkutatási Iroda látja el. Itt megvalósult az a csoda, hogy a szakma elégedett az irányítótestülettel.

És végül: mit hoz a jövő? Először is izgalmas, új eredményeket, hiszen a fent említett, még építés alatt levő kísérletek remélhetőleg ugyanolyan sikeresek lesznek, mint az eddigiek. Előrelátó fejlesztés is kell, mert noha a mai űrtechnikánkkal kívánatos partnerek vagyunk még, ez a helyzet a mai

fejlődési tempó mellett meg is változhat, ha nem védjük ki. Remélhetőleg hazánk tagja lesz az Európai Űrügynökségnek, ugyanúgy, mint ahogy csatlakozni fogunk a többi nagy európai kutatási nagyberendezéshez. Ez jelentős fejlődést hozhat, de kárt is okozhat, ha a döntéshozók nem ismerik fel, hogy tagdíjat fizetni nem elég egy terület fennmaradásához (ilyenre pedig könnyű lenne példát idézni, és a fizikusoknak nem is kell magyarázni, melyik nagyberendezés esetére gondolok). Az űrfizika nemzetközi csapatmunka, és ez így is marad. Az nem kétséges, hogy az eredmények nemcsak a tudományt gazdagítják, de a mindennapi életre is kihatnak, mert a globális folyamatok vizsgálatára aligha van jobb módszer. Könnyen adódó példa erre az időjárás globális változása, az ezt befolyásoló tényezők feltárása. A Föld űrből való megfigyelése elősegíti az árvízvédelmet, de nemrég hozzásegített egy régészeti lelet feltárásához hazánkban. A hazai űrfizikusok fontos célja, hogy Magyarország is élvezze és használja az e területen elért eredményeket.

Kulcsszavak: *Európai Űrügynökség – ESA, Föld globális monitorozása (GEMS), GALL-LEO, űrpolitika, naprendszer*



# RENDEZETLENSÉG, KOMPLEXITÁS ÉS KÁOSZ: MINDENNAPOS FOGALMAK A MODERN STATISZTIKUS FIZIKÁBAN

Temesvári Tamás

PhD, tudományos főmunkatárs, MTA–ELTE Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoport  
tentam@helios.elte.hu

Tél Tamás

a fizikai tudomány doktora, egyetemi tanár, ELTE Elméleti Fizikai Tanszék  
tel@general.elte.hu

## *Bevezetés*

A statisztikus módszerek alkalmazása a makroszkopikus rendszerek vizsgálatában a 19. század fizikájának jelentős újítása volt. A makroszkopikus folyamatokhoz képest szinte végtelen gyors, bonyolult, rendezetlen – makroszkopikus mérőműszereink nem tudnak mikroszkopikus részleteket mérni –, de tulajdonképpen nincs is szükségünk erre a feldolgozhatatlan adathalmazra. Ez a helyzet, amit nevezhetünk a „lehetetlen, de egyben fölösleges is” elvének, kényszeríti ki a valószínűség-számítás módszereinek bevezetését: a mikroszkopikus dinamika részletei helyett a mikroszkopikus állapotok általa generált valószínűségi eloszlása, illetve az ebből származtatható átlagok és momentumok az elméleti vizsgálódások tárgya.

Látjuk, hogy a rendezetlenség a statisztikus tárgyalásmód alapja, mégis a mai terminológia a rendezetlen rendszerek fogalmát más értelemben használja (lásd a következő fejezetben). A James Clerk Maxwell és Ludwig Eduard Boltzmann által kifejlesztett elmélet, amit később Josiah Willard Gibbs rend-

szerezett és tökéletesített, egyszerű egykomponensű rendszerekre szinte receptszerűen alkalmazható: kiszámítjuk az állapotösszeget, alkalmazzuk a disszipáció-fluktuáció tételt ... stb. A rendezetlenség ekkor tisztán hőmérsékleti jellegű, a Hamilton-operátor alapállapota (ahova a rendszer zérus hőmérsékleten, azaz  $T = 0$ -ra eljut) nem elfajult, a kisenergiájú gerjesztések számossága pedig az exponenciálnál kisebb. A termodinamika harmadik főtétele nyilvánvalóan érvényes ilyenkor: az entrópia – a „rendezetlenség mértéke” – nullához tart a hőmérséklettel együtt.

## *Rendezetlenség*

Azok a rendszerek, amiket manapság rendezetleneknek nevezünk, a rendezetlenséget magában a Hamilton-operátorban hordozzák – azaz a mikroszkopikus energia-kifejezésben, ami meghatározza a dinamikát –, illetve ha nem, akkor bizonyos kísérleti körülmények esetén ehhez hasonlóan viselkednek (ilyenek az „igazi” üvegek, mint az ablaküveg, lásd az alábbi (b) példát). A statisztikus fizikai kutatások igen jelentős hányada – mind kísérleti, mind pedig elméleti szinten – irányult, a múlt század hetvenes éveitől kezdve, ezen

rendszerek legfontosabb tulajdonságainak a megértésére. Mindazonáltal a probléma nehézségét jelzi, hogy három évtized igen intenzív kutatása után, a prototípusnak tekinthető spinűvegek (Mézard et al., 1987) ([a] példa) néhány alapvető kérdése még napjainkban sem tisztázott (De Dominicis et al., 1998). Tekintsünk meg három tipikus példát:

(a) A spin üvegek Edwards–Anderson-féle modelljének Hamilton-függvénye

$$-\sum_{ij} J_{ij} S_i S_j$$

ahol az  $S_i = \pm 1$  Ising spinek egy tökéletes kristály rácspontjaiban helyezkednek el, a  $J_{ij}$  -k viszont véletlenszerű kölcsönhatási energiák (váltakozó előjellel) a mágneses momentumok között. Ez utóbbiak szimulálják a valódi spinűvegekben (például CuMn) a véletlenszerűen elhelyezkedő mágneses momentumok (Mn) közötti oszcilláló – hol ferro-, hol pedig antiferromágneses kölcsönhatást.

(b) Túlhűtött folyadékok elkerülhetik a kristályosodást. Ilyenkor alacsony hőmérsékleten egy rendezetlen atomi konfiguráció körüli lokális oszcillációk jelentik a termikus mozgást. Ez az üvegállapot valójában metastabil, a rendkívül lassú folyamatok a metastabil állapotok közötti aktivációs dinamika következményei.

(c) Fehérjemolekulák rendezetlenségét azok elsődleges szerkezete, azaz az aminosavak véletlenszerű sorrendje okozza.

A rendezetlen, illetve komplex rendszerek fogalmát ma már szinte szinonimaként használjuk, habár vannak olyan esetek, amikor a rendezetlenség nem jár együtt komplex viselkedéssel. (Gondoljunk egy kristályos kettős ötvözetre: a benne  $T=0$ -n megmaradó, ún. reziduális entrópia pusztán a keveredés következménye.) Habár nincs elfogadott általános definíciója annak, hogy mit nevezünk komplex rendszernek, a „lehetetlen, de egyben fölösleges is” elv

egy magasabb szintű érvényesülése látszik annak a közös aspektusnak, ami ezeket az annyira különböző jelenségeket összefogja: egy ilyen rendszer konkrét realizációja lényegében tárgyalhatatlan (elsősorban az inhomogenitások miatt), de az eredmények esetlegessége miatt szükségtelen is. Újra csak a valószínűség-számításra van szükség, most azonban a makroszkopikus mennyiségek realizációk közötti eloszlása szolgáltatja a *tipikus* információkat (szemben az *esetlegesekkel*). A „mikroszkopikusan bonyolult dinamikát”<sup>1</sup> most a makroszkopikus mennyiségek rendkívüli érzékenysége kíséri a rendszer paramétereinek csekély megváltoztatására.

A teljesség igénye nélkül tekintsünk néhány olyan jelenséget, amelyek rendezetlen rendszerekben széleskörűen előfordulnak:

(a) Az egyensúlyi termodinamika nem írható le egyszerű Gibbs-eloszlás alkalmazásával: bonyolult ergodicitásértés lép fel, és/vagy az alacsony energiájú metastabil állapotok szerepe jelentős (az ún. komplexitás – vagy más néven konfigurációs entrópia –, ami az adott energiájú metastabil állapotok számának logaritmus, makroszkopikussá válik).

(b) A – fentebb említett – nagyfokú érzékenység a rendszer mikroszkopikus paramétereinek kis megváltozására nem az egyetlen káoszszerű jelenség (a káosz definícióját a következő részben adjuk meg). Az ún. *sztatikus* káosz esetén egy kontrollparaméter infinitezimális megváltoztatása egy olyan új termodinamikai állapotot ad, amelyik teljesen korrelálatlan az előzőhöz képest (például a metastabil állapotok átrendeződnek) (Bray – Moore, 1987). Példaként említhetjük a spinűvegeket, amelyekben a *hőmérsékleti* káosz (vagyis az a sztatikus káosz, ahol a hőmérséklet a megfelelő kontrollparaméter) divatos és máig nem teljesen tisztázott probléma.

<sup>1</sup> Ludwig Boltzman kinetikus elmélet kidolgozásakor bevezetett szóhasználatában „molekuláris káoszt” említ.

(c) Az egyszerű statisztikus fizikai rendszerek egy véges relaxációs idő eltelte után egyensúlyi dinamikát követnek: az ún. két-idefüggő mennyiségek mint a korrelációs- és válaszfüggvények, csak a két idő különbségétől függenek (időeltolási invariancia), és mindig teljesül a fluktuáció-disszipáció tétel. Ezzel szemben a komplex rendszerek tulajdonképpen soha nem jutnak el a termikus egyensúly állapotába, a relaxációs idők egy végtelen spektrumával rendelkeznek. Mindennapos kísérleti tapasztalat, hogy az ilyen rendszerek viselkedése függ a preparációs időtől (ezt hívják várakozási időnek). Az időeltolási invarianciának ez a sérülése egy permanens öregedési folyamat (aging), a polimerek világában régtől fogva ismert.

A komplex fizikai rendszerek újszerű fogalmai, elméleti megközelítései, a kifejlesztett számítógépes szimulációs eljárások és kísérleti protokollok más tudományokat is elérték. Nem törekedvén teljességre, elsősorban az ideghálózatokat és az optimalizációs problémákat említhetjük (Mézard et al., 1987), de fontos alkalmazások születtek a biológiában (evolúcióelmélet, illetve makromolekulák) (Stein, 1992), vagy akár a pénzügytudományban (Bouchaud–Potters, 1997).

### Dinamikai káosz

A nagy szabadsági fokú rendszerek bonyolult mikroszkopikus dinamikáját, a boltzmanni értelemben vett molekuláris káoszt, manapság a *zaj* szinonimájaként használjuk. A zajos mozgás a nagyon sok összetevőből álló rendszerek valamely komponensének véletlenszerű viselkedése (például egy részecske Brown-mozgása, termikus zaj), mely a környezettel való bonyolult kölcsönhatás következménye. Ennek fényében meglepő az a megfigyelés, hogy bonyolult mozgás egyszerű rendszerekben is kialakulhat. A bonyolultság ilyenkor nem az igen sok összetevő jelenlétéből adódik, hanem a kevés komponens erős (de egyszerű törvényt

követő) kölcsönhatásából, a *belső* dinamikából. Az 1980-as évek óta a tudományos szóhasználatban elterjedt „káosz” fogalma (Gleick, 1999; Szépfalusi – Tél, 1982) a szó eredeti értelmében ezért időbeli folyamatokra utal. A kaotikus viselkedés az egyszerű, kevés változóval leírható rendszerek olyan mozgása, melynek fő tulajdonságai (Götz, 2001; Tél – Gruiz, 2002):

- (a) időben szabálytalan, nem áll elő véges számú periodikus mozgás összegeként sem, aperiodikus;
- (b) hosszú távon előre jelezhetetlen, és érzékeny a kezdőfeltételre;
- (c) a fázistérben komplex, de rendezett: fraktál szerkezetű.

Káosz már minden háromváltozós, elsőrendű, autonóm differenciál-egyenletrendszer esetén megjelenik, ha az kellően általános, pontosabban *nemlineáris*. Ennek megfelelően bármelyik gerjesztett egydimenziós nemlineáris mozgás lehet kaotikus. Az egyik tipikus és egyben legegyszerűbb példa kaotikus mozgásra ezért az

$$\dot{x} = -\alpha x - \omega_0^2 x - \varepsilon x^3 + A \cos(2\pi t/T)$$

egyenlettel leírt szinuszosan gerjesztett anharmonikus oszcillátoré.

A káoszt a fent felsorolt tulajdonságok közül gyakran a másodikkal definiálják. Egy rendszer akkor érzékeny a kezdőfeltételeire, ha a közeli kezdőpontokból induló mozgások időben exponenciális ütemben válnak szét, azaz kis kezdeti különbségek jelentős végállapotbeli különbségre vezetnek. A szétválás átlagos erősségét mérő mennyiség az ún. átlagos Ljapunov-exponens. Érdeemes rámutatni azonban arra, hogy a fenti tulajdonságok általában egymást feltételezik, egyszerre vannak jelen. Ha tehát egy fizikai rendszer hosszú távon aperiodikus, akkor időbeli fejlődése előre jelezhetetlen, és egyben alkalmas ábrázolásban fraktál szerkezetű. Talán éppen e tulajdonságok együttes jelenléte miatt szokás időnként a kaotikus

viselkedésű rendszereket is komplex rendszereknek tekinteni.

E tulajdonságok mögött egyetlen közös vonás áll: az, hogy a hosszú idejű viselkedés csak *valószínűségi* fogalmakkal írható le. A kezdeti feltételekre való érzékenység miatt a hosszú idejű állapot ugyanis még a lehető legkisebb, de óhatatlanul véges kezdeti pontatlanság esetén sem adható meg pontosan. A hosszú idő után beálló lehetséges állapotok száma igen nagy, ezért ismét a „lehetetlen, de egyben fölösleges is” elvének követésével járunk el. Érdeemes annak a valószínűségét vizsgálni, hogy egy mozgó pont a fázisér egy pontjának közelébe esik. Elegendően hosszú idő után ez az eloszlás független az időtől (stacionárius), és kiderül, hogy tetszőleges pontossággal megadható. Periodikusan gerjesztett rendszerekben érdemes ezt az eloszlást a  $T$  gerjesztési idő egész számú többszöröseinek megfelelő pillanatszelepeken vizsgálni. A gerjesztett anharmonikus oszcillátor esetén ez az eloszlás az  $(x, v \equiv \dot{x})$  kétdimenziós fázisér egy fraktál részalmazán, az ún. kaotikus attraktoron ül. Az eloszlás rendkívül egyenetlen, nagyon nagy és kis értékek tetszőlegesen közel kerülhetnek (Tél – Gruiz, 2002). Az eloszlás maga is fraktál, végtelen sok, de különböző súlyú Dirac-delta összege. Az átlagos Ljapunov-exponens a lokális távolodási rátáknak ezzel az eloszlással képzett átlaga.

Érdeemes hangsúlyozni, hogy csak azok a bonyolult időbeli viselkedések tekintendők kaotikusnak, melyek egyszerű törvényekből következnek. *A káosz átmenet a szabályos és a zajos mozgás között.* A zajos mozgások a fázisér egyenletesen töltik ki, bennük fraktál struktúrák nem alakulhatnak ki, eloszlásuk sima.

A kaotikus mozgások egy további tulajdonsága, hogy *paramétereinek* csekély megváltoztatása jelentős viselkedésszerű különbségekre vezet (akár a valószínűség-eloszlás jellege is alapvetően megváltozhat, a mozgás kaotikusból szabályosba válthat).

Ez az a tulajdonság, mely a rendezetlen rendszerek elméletében a sztatikus káosz fogalmához vezetett.

Kaotikus mozgással számos hétköznapi jelenség is kapcsolatos, mint például a tézstagyúrás, melynek során az egyes anyagok (só, vaj stb.) részecskéi kaotikusan sodródhatnak, s éppen ez vezet a jó keveredéshez. A turmixgép annál hatékonyabb, minél kaotikusabb benne a folyadékelemek mozgása. Ma még kevesen tudják, hogy a környezeti szennyezések nagyskalájú terjedése is kaotikus folyamat.

A káosz jelensége számos tudományban a matematikától kezdve (Szász, 2000), a memőki tudományokon (Károlyi – Domokos, 1999; Stépán, 1991), a meteorológián (Götz, 2001) és biológián (Cushing et al., 2003; Scheuring et al., 2003) keresztül az égi mechanikáig (Érdi, 2001) alapvető szemléletváltásra vezetett. A káosszal járó gondolkodásmóda társadalomtudomány számos területét is új megvilágításba helyezi (Fokasz, 2003).

### *Térbeli és időbeli káosz*

Hosszú ideig tartó kaotikus viselkedés csak a termodinamikai egyensúlytól távol eső rendszerekben alakulhat ki, melyeken energia- vagy részecskeáram folyik keresztül. Az ilyen rendszerekben a térbeli kiterjedés is gyakran fontos szerepet játszik. Minden parciális differenciálegyenlettel leírt térbeli és időbeli folyamatban (pl. áramlások, kémiai reakciók, ingerületvezetés) nem túl nagy energiabefektetés esetén előfordulhat, hogy a mozgásban a szabadsági fokok bizonyos csoportjai vesznek csak részt, így a mozgás effektíven alacsony dimenziós. Egyszerű példa az égés elméletében használt Kuramoto-Sivászinszkij-egyenlet:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = a\Delta\psi - b\Delta^2\psi + c(\nabla\psi)^2$$

A megfigyelő számára a véges sok szabadsági fok szereplése azt jelenti, hogy többé-kevésbé szabályos *térbeli mintázatok* (például hullámok) vonulnak át a rendszeren,

de ezek ismétlődése időben sohasem pontosan periodikus. Az ilyen térbeli és időbeli káosz (spatiotemporal chaos) tehát első közelítésben bizonyos térbeli struktúrák előfordulási gyakoriságában mutatkozik meg (Pandit et al., 2002). Az ilyen folyamathoz alacsony dimenziós kaotikus attraktor is tartozhat. Ugyanakkor a jellemző térbeli struktúra megjelenése számos új jelenséggel (nemlineáris hullámok, csúcsok, frontok, határéteg, szinkronizált viselkedés) kapcsolatos. A determinisztikus káoszhoz hasonlóan a térbeli és időbeli káosz jelenléte sem dönthető el az egyenletek és paraméterek ismeretében, csak méréssel vagy szimulációval. Mára sok, első közelítésben tisztán időbeli káoszknak tűnő jelenségről (mint például a populációk viselkedése, járványok) derült ki, hogy pontosabban megfigyelve térbeli káoszt is mutatnak.

#### *Összefoglalás, kitekintés*

A komplexitásnak számos megjelenési formája lehetséges. E fogalom pontos definíciójának megadását ezért meg sem kíséreljük, csupán jelezzük, hogy az itt felsorolt jelen-

ségeken kívül sok más összefüggésben is megjelenik (Kocarev – Vattay, 2005). A komplex rendszerek vizsgálata kétségtelenül igen jelentős modern kutatási terület.

Ennek illusztrálására egyetlen példa: a komplex viselkedés szabályozása. Az egyszerű időbeli káosz kontrollálható, azaz a mozgás alkalmas külső beavatkozással egyszerűvé, periodikussá tehető (Petrov et al., 1993). Ennek analógiájára remélhető, hogy a térbeli és időbeli káoszt mutató rendszerek is periodikussá tehetőek, azaz bizonyos térbeli mintázatok stabilizálhatók (Pandit et al., 2002). Még általánosabban: az a kérdés merül fel, hogy a sokkomponensű komplex rendszerek, például egy repülőgép esetében található-e olyan munkapont, ahol *bármelyik* összetevő kis megváltozása esetén a rendszer visszatér az eredeti állapotba, vagyis globálisan stabil. Ennek megválaszolása a jövő feladata.

Kulcsszavak: *mikroszkopikus dinamika, rendezetlenség, termodinamika, komplex rendszerek, káosz, nemlinearitás, valószínűségi leírás*

#### **IRODALOM**

Bouchaud, Jean-Philippe – Potters, Marc (1997): *Théorie des risques financiers*. Aléa-Saclay (coll.) CEA, Paris  
 Bray, Alan J. – Moore, Michael A. (1987): Chaotic Nature of the Spin-glass Phase. *Physical Review Letters*. **58**, 57.  
 Cushing, J. M. et al., (2003): *Chaos in Ecology: Experimental Nonlinear Dynamics*. Academic Press, NY  
 De Dominicis, Cyrano – Kondor, I. – Temesvári, T. (1998): In Spin Glasses and Random Fields. In: Young, A. P. (ed.): *Series on Directions in Condensed Matter Physics*. Vol. 12. World Scientific, Singapore  
 Érdi Bálint (2001): *A Naprendszer dinamikája*. Eötvös, Budapest  
 Fokasz Nikosz (szerk) (2003): *Káosz és nemlineáris dinamika a társadalomtudományokban*. Typotex, Budapest  
 Gleick, James (1999): *Káosz, egy új tudomány születése*. Göncöl, Budapest  
 Götz Gusztáv (2001): *Káosz és prognosztika*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest  
 Károlyi György – Domokos Gábor (1999): Symbolic Dynamics of Infinite Depth: Finding Invariants for BVPs. *Physica D*. **134**, 316.  
 Kocarev, Ljupco – Vattay Gábor (eds.) (2005): *Complex*

*Dynamics in Communication Networks*. Springer, Berlin  
 Mézard, Marc – Parisi, G. – Virasoro, M. A. (1987): *Spin Glass Theory and Beyond*. World Scientific, Singapore  
 Pandit, Rahul et al. (2002): Spiral Turbulence and Spatiotemporal Chaos: Characterization and Control in Two Excitable Media. *Physica A*. **306**, 211.  
 Petrov, Valery – Gáspár Vilmos et al. (1993): Controlling Chaos in the Belousov-Zhabotinsky Reaction. *Nature*. **361**, 240.  
 Scheuring István et al. (2003): Spatial Models of Prebiotic Evolution: Soup before Pizza? Origins of Life and Evolution of the Biosphere. **33**, 319.  
 Stépán Gábor (1991): Chaotic Motion of Wheels. *Vehicle System Dynamics*. **20**, 341.  
 Stein, Daniel L. (ed.) (1992): *Spin Glasses and Biology*. Series on Directions in Condensed Matter Physics. Vol. 6. World Scientific, Singapore  
 Szász Domokos (ed.) (2000): *Hard Ball Systems and the Lorentz Gas*. Springer, Berlin  
 Szépfalusi Péter – Tél Tamás (szerk.) (1982): *A káosz*. (Akadémiai, Budapest  
 Tél Tamás – Gruiz Márton (2002): *Kaotikus dinamika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest

## 125 éve született Bartók Béla

### SZÁMOMRA MINDEN NAP BARTÓK-ÉVFORDULÓ...

Teimer Gáborbeszélgetése  
Kocsis Zoltán zongoraművésszel,  
a Nemzeti Filharmonikusok főzeneigazgatójával

*Lassan túl vagyunk az év első negyedén, de a Bartók Béla születésének 125 esztendő évfordulójához kapcsolódó ünnepi események épp csak elkezdődtek. Eközben Ausztriában már a csapból is Mozart folyik.*

Igen, de ők nagyságrendekkel többet is áldoznak a Mozart-évre, mint a mi 285 millió forintos ünnepi büdzsénk, ráadásul Mozart harmincöt év alatt jóval többet hagyott az utókorra, mint Bartók a hatvannégy éve alatt.

*Rendben, de a Bartók nevével fémjelzett rádióadó esténként Mozart operáiból sugároz egyet-egyet. Ráadásul a nyitókoncertet sem a zeneszerző születésének napján tartják, mert egy másik, korábban leegyeztetett előadás ezt megakadályozza. Ahogy az egyik tanácsadó fogalmazott: „a hosszú távú koordináció és az ésszerű egyeztetés még nem hungarikum”. Azért ez valahol számalmas, nem gondolja?*

Nézze, kérdezze meg azokat, akik ebben az ügyben is a mundér becsületét védik, kérdezze meg a minisztériumot. Szerintem egyéb-

ként szégyen, de minden felháborodásom dacára azt kell mondanom, hogy nem érdemes senkire ujjal mutogatni, inkább fel kell tenni a lényegi kérdést: vajon valójában hogy áll Bartók Béla reputációja, mennyire lett a zenéje közkincs?

*A kérdés abszolút indokolt, mert beszélgettem már elismert énekesrel is, aki megsírgta, hogy őt Bartók dalaival ki lehet kergetni a világból.*

Ez előfordulhat; amikor én az első Bartók-művekkel találkoztam, azok számomra is idegenek voltak, el tudom fogadni, ha valaki egész életében így érez. De nem is arra gondoltam, hogy a szakma mennyire fogadta őt be, vagy mennyire illeszkedik az európai értékrend kánonjába. A kérdés kapcsán az foglalkoztat, hogy milyen tömegeket vonz mondjuk egy *Kékszakállú*, és milyen hatása van. Nem mintha ez pontosan mérhető lenne, de azért valahol a köztudatban mégis benne kellene élnie, hogy mi az a *Kékszakállú herceg vára*, a *Csodálatos mandarin* vagy *A fából faragott királyfi*, hogy csak a legismertebb Bartók-műveket említsem. Sajnos azt kell mondanom, hogy Bartók alkotásai egyáltalán nincsenek köztudatban. Olyan értelemben, mint ahogy Mozart, Beethoven,



Bach vagy akár Franz Schubert művei, Bartók zenéje nem vált közkinccsé, és kétlem, hogy valaha is igazán azzá válhat.

*Kortársai munkáival összevetve is erre az eredményre jutunk?*

Arnold Schoenberg kapcsán viszonylag egyszerű a válasz, hiszen ő túl keveset írt, s túlon túl a vájtfülűeknek komponált. Igor Sztravinszkijra könnyű azt mondani, hogy elfogadottabb, de az életmű teljességét vizsgálva már nem ugyanez a helyzet. Az ő esetében elsősorban a balettjeit, s bizonyos kamaraműveit játsszák, de az életmű zöme nem vált repertoárdarabbá. Én a *Perséphonét* vagy a *Csalogányt* idehaza még nem hallottam, de például nálunk csak most mutatják be a *Maurát* is. Érzésem szerint tehát akkor járunk el helyesen, ha úgy tesszük fel a kérdést: maga a XX. századi zene mennyiben vált közkinccsé, és ebben milyen helyet foglal el Bartók művészete. Véleményem szerint ebből a szempontból viszonylag egyértelműen kijelenthetjük: Bartók zsenialitása abból adódik, hogy egy épp felbomlóban lévő zenei világnyelv utolsó képviselőjeként még összefoglalhatta mindazt, amit az európai zenekultúrából magába olvasztott. Meggyőződésem, hogy Bartókra a világnak művészeti összefoglalása miatt van szüksége.

*Mintha azonban épp ez a szintetizáló jelleg korlátozná Bartók széleskörű elfogadottságát...*

Nos igen, épp ennek ürügyén kerülök általában sokakkal ellentétbe, mert én igenis úgy vélem, hogy nem lehet az ő zenéjéhez úgy közelíteni, hogy az előadó nem ismeri a bartóki zene minden eredetét. Ahhoz ugyanis, hogy valaki Bartókkal értő módon képes legyen foglalkozni, nagyon nagy utat kell bejárnia. Bartók rengeteget merített a francia kultúrából, a bécsi iskola szerzőinek munkáiból, a kelet-európai népdalkultúrából. A most felsorolt három terület mellett szólni kell az

Európán kívüli területek zenei hatásáról is, a török, arab és egyéb motívumokról. Ennek következtében éveket vesz igénybe Bartók zenéje minden alapmotívumának megismerése. Nagyon széleskörűen kell tehát ismerni az európai, de elsősorban a kelet-európai zenekultúrát ahhoz, hogy Bartókot megértsük. Ugyanakkor muszáj hangsúlyoznom, hogy nem kell kelet-európainak lenni ahhoz, hogy Bartókot jól játssza az előadó, vagy legalábbis azzal a szeretettel közelítsen hozzá, ahogy megítélésem szerint kell. Én például itt születtem, a Magyar Rádió adásain nőtettem fel, s ahogy említettem, belőlem is idegenkedést váltott ki az első találkozás Bartók műveivel. Kilenc-tíz éves lehettem, amikor a *Hegedűverseny* megfogott, s ott éreztem meg valamit abból, hogy az enyémmel jóval színesebb, tágasabb zenei világképek is létezhetnek.

*Bartók világlépe valóban nyomon követhetően tárgult, a nacionalizmustól indulva eljut a világpolgárságig, s ez a befogadó szemléletmód nyilván a zenéjében is tapinthatóvá válik.*

Még a nacionalista műveiben is sokrétű hatás figyelhető meg. Vegyük az opus 2-es, zene-karra és zongorára írott *Scherzót*. 1904-ben az igazi magyar népzene még nem ismeri, és a francia zenével sem került kapcsolatba, ennek ellenére már megkülönböztethetünk e művében egy bokázós, magyar, nemzeti romantikus, *giusto*-jellegű hangulatot, ami nagyon emlékeztet az Erkel-féle palotások stílusára. Emellett érezhető Richard Strauss heroizáló zenei felfogása, de tettenérhető Liszt és Chopin hatása is a mű középrészében. S nagy meglepetésként, a darab végére, önmagát tíz-tizenöt évvel megelőlegezve, Liszt *Faust-szimfóniá*-jára emlékeztető módon eltorzítja az első rész ideális anyagait, de már bartóki ízléssel. Egy olyan hihetetlenül egyéni stílust kovácsol, ami viszont már semmiképpen nem kötődik semmilyen őt ért hatáshoz, ez már az ő egyénisége. Bartók

ugyanis Kodályval és Dohnányi Ernővel ellentétben szinte minden hatást asszimilált, majd bizonyos hatásokat egyszerűen kivetett magából, másokat beépített. Lisztet is ezért csodálta, hiszen – ahogy akadémiai székfoglalójában hangsúlyozta is – neki is az volt a „hibája”, hogy amerre járt a világban, mindenütt felcsippentett valami hatást, majd ki is írta magából. Ezáltal persze rengeteg megkérdőjelezhető anyagot is hagyott az utókorra, ugyanakkor olyan kivételes tehetség volt, hogy még a legsilányabb darabokon is rajta hagyta a keze nyomát. Ennek okán mindkettejük esetében azonnal megállapítható, hogy az adott művet Liszt avagy Bartók komponálta, s mindkettejükre igaz a legnagyobb zeneszerzőket jellemző tulajdonság: az első, eredeti zenei gondolat mindig egyéni ízzel díszített.

**„...egyetlen hányaveti, Bartók előírásaira ügyet sem vető előadás sokkal többet árt...”**

*A korábban említett tágasabb, színesebb világkép sokszor kivételes technikai képességeket, erőfeszítéseket is követel, ami talán egyeseket felkészületlenségéből, másokat kényelemből tart távol Bartóktól.*

Hogyne, nagyon sokan a ma előadóművészei közül Bartókot csak egy izgalmas kirándulásnak tekintik. Zongoraművészek letudják a *Zongoraszonátá*-val, a *Szvit*-tel, a *Szabadban*-nal és esetleg a *Mikrokozmosz* néhány darabjával. A karnesterek a *Concertó*-t, a *Tánc-szvit*-et, a *Mandarin szvit*-et, s jó esetben a *Divertimentó*-t és a *Zene híros hangszerekre, ütőkre és celestára* című művét vezénylik. Rá is igaz, ami minden nagy komponistára, hogy vannak népszerű és kevésbé népszerű darabjai, ennél azonban jóval bővebb az értékes zenekari és egyéb műveinek listája. Még talán a hegedűművészek azok, akik ha megtanulják egy darabját, akkor nagy valószínűséggel eljátsszák a többit is.

*Nyilván játszanák a többi művet is, ha Bartók nem lett volna olyan kérelhetetlenül szigorú saját műveinek előadásmódját illetően. Ezek a tilalomfák talán ismét a befogadás ellen hatnak.*

Az én álláspontom szerint Bartók szakmai igényessége nagyon is segíti az újraértelmezést, ugyanis ha egy hozzá méltó előadó nyúl a műveihez, akkor a sok korlát között annyi szabadságot talál, hogy könnyen hoz létre újabb és újabb előadásokat, még ha nem is alapjaiban különbözőeket. Ha egy Bartók-darabhoz nyúlok, és sikerül meglelnem a játéktér határait, azon belül én korlátlan úr lehetek, feltéve, ha ismerem a stílust. Bartók is erre hivatkozik, amikor kijelenti, hogy mivel az élőlények sajátja a változékonyság, így maga a szerző is minden alkalommal másként és másként játssza el ugyanazt a művét.

*Ha már az újraértelmezést és a változékonyságot említette – nem nagyon használ egy zeneszerzőnek az sem, ha műveinek értelmezését, előadásmódját megfellebbezhetetlen kánonok szabják meg. Erre hivatkozva, legutóbb épp az Operaház ünnepi előadását akarták ellehetetleníteni. Hol itt a változékonyság?*

Ez nagyon kényes kérdés, de semmi esetre sem akarom megkerülni az állásfoglalást. Bartók soha nem írta le, hogy milyen társalkotókra van szüksége – társalkotók alatt most rendezőket értve –, illetve hogy e rendezőknek milyen tág a játéktérük. Arról nem is beszélve, hogy az európai folyamatok sem a megkövesedett, életelen előadások irányába mutatnak. Grazban a *Parsifal*-ban a Szent Grál egy mosdókagyló, s az egész történet egy mosdóban játszódik, a viráglányok pedig tolszakécs nénikék. Ehhez képest az, hogy a Kékszakállú hercegnek nyolc felesége van, megítélésem szerint nem olyan nagy baj. Meggyőződésem, hogy egyetlen hányaveti, Bartók előírásaira ügyet sem vető elő-

adás sokkal többet árt, mintha valaki alkotó, s egyben értő módon nyúl a darabhoz. Ki vonja ugyanis felelősségre azt a zongoristát, aki a kelleténél másfélszer lassabban játssza a Bartók-szonáta második tételét? Ugyanakkor miért kell elmarasztalni engem, ha egy alkotás népszerűsítése érdekében azt átültetem, átfomálom? Lehet bámit mondani, én elítélem az ilyesfajta szűklátókörű jogvédelmet, amellyel már én is szembesültem. Akkor azt mondtam: belenyugszom, mert semmit nem tudok tenni ellene, de felmerül a kérdés, vajon milyen alapon állapíthatja meg valaki, hogy az én értelmezésem használ-e a műnek vagy árt? Ezért is javasoltam azt, hogy állítsanak fel grémiumot, amelyik sok-sok ember véleményét megfontolva dönt ebben a kérdésben.

*Ha már a felelős döntést említi: nemrég hallottam egy beszélgetést, melyben felvetették, hogy Bartók reputációját talán marketing-eszközökkel is segíteni lehetne. Mit szólna egy Bartók-tallérhoz vagy egy Bartók-golyóhoz?*

Mozart a rokokó korszak prominens figurája volt, megítélésem szerint ezt az ő személye jobban elviseli. De vajon méltó-e ahhoz a zeneszerzőhöz, akinek nevéhez a *Don Giovanni* is fűződik? Persze Olaszországban is minden tizedik hotelt Verdiről nevezték el, és Bartók is szerepelt már bankjegyen. Óvatos vagyok, de úgy érzem, talán használna neki, ártani biztosan nem ártana.

**„Akkor már nem tudott rosszat írni...”**

*Túl a zenei korlátokon, vajon milyen egyéb okok szólnak Bartók ellen? Számos kortársa kiállhatatlanként, perfekcionistaaként, mániakus magyarázóként jellemezte. Mintha a személyisége sem igazán a népszerűség irányába hatott volna.*

Ezt többek között Márai Sándor mondja róla, de sok más ismerőse is megegyezett abban, hogy ő meglehetősen egocentrikus volt. De kérdem én: melyik zseniális zeneszerző nem az? Richard Wagner másról sem tudott beszélni, csak magáról, Johannes Brahms minden második percben vérig sértett valakit. Pusztán ezért ítéljek el valakit?

*Leveleit, írásait olvasva olyan érzése támad az embernek, hogy a hírt mindkét oldalról feszítették.*

*A támadásokra válaszként, egocentristamusa engesztelhetetlenséggel párosult.*

Hogyne, hiszen vannak olyan helyzetek, amikor embernek kell lenni. Ilyen helyzet volt az 1930-as évek vége, amikor Bartók a terjeszkedő fasizmus elleni tiltakozásul elhagyta az országot. Ez egyértelmű és megkerülhetetlen állásfoglalás volt.

*Úgy tűnik, állásfoglalása ellenére életében nem volt rá szükség sem itthon, sem a tengerentúlon. A megbecsülésnek ez a hiánya hat a mai napig is?*

Árnyalendő a képet kénytelen vagyok Tallián Tibor megállapításaira hivatkozni: akár-hogyan is volt, Bartók idehaza kivételezett helyzetben volt, s kint csak a halála nyomán feltámadó lelkiismeret-furdalás tette népszerűvé. Ismét ő boncolgatja, hogy vajon miért nem közeledett Bartók azokhoz, akiktől ő megrendeléseket remélhetett volna. Miért nem közeledtek magához Bartókhoz a kor prominens zenészei? Miért kapott a Bartók házaspár egy koncertjéért csak 300 dollárt, míg ugyanakkor Jascha Heifetz 9000-et?

*Miért?*

Én azt gondolom, hogy Bartók nem volt naiv, tudta, ismerte az élet farkastörvényeit, de ugyanakkor idealista is volt. Még magának sem merte bevallani, hogy újonnan választott hazájának sincs igazán szüksége rá. Ezzel persze nem volt egyedül, hiszen nem kellett Schoen-

berg, Sztravinszkij is csak szőrmentén, s bár Szergej Rahmanyinov jól keresett, soha nem lett amerikai. Eközben Dimitrij Sosztakovics sokkal szömyűbb élete során végig komponálhatott, így életműve töretlen maradt, míg a többiek elhallgattak vagy küszködtek. Mindenki valahonnan jött, valamire emlékezett, nem véletlen, hogy a *Concerto* negyedik tétele olyan hangonszóal meg, ahogyan. A szülőföld mégiscsak szülőföld.

*Félrevezet tehát a feltételezés,  
hogy Bartók azokat a hatásokat  
már nem tudta befogadni?*

Szociológiai szempontból nem, zeneileg viszont mindenképpen, hiszen a 3. *zongoraverseny* II. tételében példának okáért kint honos madarak éneke ismerhető fel, mint ahogy a *Concerto*-ban is vannak kifejezetten amerikai vonások. Arról sem feledkezhetünk meg, hogy bár három évig hallgat, utána játszi könnyedséggel megírja a már említett darabokat és a *Szonáta szólóhegedűre* című művét. Vagyis az őt érő hatások nem bénítólag, hanem termékenyítőleg hatottak rá. Korábban sem komponált folyton, hol népdalt gyűjtött, hol tanított, és ha ideje engedte, gyakorta akár egy padon írta meg műveit.

*Akkor talán igaz lehet a halálos ágyán tett  
keserű megállapítása: „Csak azt sajnálom,  
hogy tele kofferrel megyek el...!”*

Biztos vagyok benne, hogy egy „7. vonósnégyes” megszülethetett volna még, nem is beszélve a félbehagyott brácsaversenyről, aminek már a vázlatai alapján kijelenthetjük: abszolút mestermunka, de befejezéséhez egy bartóki kvalitású zeneszerző kellene. Ilyen értelemben tele maradt a poggyász, s meggyőződésem, hogy igazat állított Lendvai Ernő, s Bartóknak kinti éve kezdete óta megrendeléseket kellett volna kapnia. Ha ez így történik, ontja magából a műveket, mert akkor már nem tudott rosszat írni.

*Ha művekkel adós is maradt számunkra, mi  
az, amit örökül hagyott?*

A népzene oktatása, kutatása, feldolgozása mindenképpen megemlítendő, hiszen hogy mi népzénét tanultunk, az nagymértékben köszönhető neki és Kodály Zoltánnak. Szintén az ő nevéhez is köthető a modern zenepedagógia megteremtése, amelynek ügyén szintén Kodállal dolgoztak. Szakmai következetességet, ami nélkül nem lehet igényes előadásokat létrehozni, s egy követésre érdemes zeneszerzői magatartást. Meggyőződésem, hogy a polihisztor Bartók hálás téma, de ő mégis zeneszerzőként volt igazán eredeti.

*Az említett szakmai igényesség, melyet Ön  
gyakorta számon is kér másokon, mennyi-  
ben él tovább?*

Legutóbb Kurtág Györggyel folytatott közös munkánk során örömmel tapasztaltam, hogy ez igenis létezik, s rajta kívül is vannak számosan, akik komolyan veszik. Sajnos ebben nem tudok kompromisszumot kötni. Akár Bartók, én is könnyen tolerálok, ha valaki gyengébb képességű zenész, de azt nem tudom elviselni, ha nem tesz meg mindent, hogy a lehető legtöbbet hozza ki magából. Aki arra használja a tehetségét, hogy könynyebbé tegye az életét, bünt követ el.

*Ezt jelenti tehát Önnek a Bartók-évforduló?*

Számomra nincsenek évfordulók. Kampánycéllal elővenni őt, hasznos lehet, de én egész életemben ezt művelem. Keresem művei igazságát, miközben igyekszem olyan megoldásokat az utókorra hagyni, amelyek megmutatják indítatásának frissességét, s a benne megnyilatkozó mérhetetlen szabadságot. Számomra minden nap Bartók-évforduló.

Kulcsszavak: *Bartók-évforduló, Bartók-recepció, XX. századi zene, népzene*

## AZ ISMERETLEN BARTÓK

Wilheim András

egyetemi adjunktus

Liszt Ferenc Zeneművészeti Egyetem

wilheim@c3.hu

Születésének százhuszonötödik évfordulóján s halála után immár fél századdal nevezhetjük-e ismeretlennek azt a komponistát, akivel kapcsolatban, mondhatjuk: mára világméretű konszenzus alakult ki arról, hogy ő a XX. század első felének egyik legfontosabb alkotója? A kérdés – és persze a vele sugallt válasz – első pillanatban talán nem az ünnephez illő; pedig éppen ez lehetne az egyik legfontosabb, legérvényesebb kérdés, hozzátéve persze, hogy nem csupán Bartókról szólnán, hanem alkalmasint bárkiről, a múlt nagyjai közül. S talán éppen a legnagyobbakról, akikről mintha mostanra kissé megkövesedett volna ítéletünk és ismeretanyagunk – s csak alig érzünk indíttatást arra, hogy revideáljuk nézeteinket, hogy valóban számot vessünk azzal, *minek* az ismeretén, sőt: milyen mélységű ismeretén alapszik az az interpretáció, amelyet a sajátunknak érzünk. Nem a szerzőkről, hanem kultúránkról mondunk ítéletet, ha bevalljuk: a klasszikusok életművének szerény szeletét ismerjük csak igazán, s mindazt, amit véleményként, ítéletként, értelmezésként elfogadunk, voltaképpen szóbeszédre, konszenzusra, tanultmondott dolgokra alapozzuk inkább, semmint személyes tapasztalatra. A zenetörténet nagyjai közül említjük most először a régi mestereket: tudjuk-e valóban, átérezzük-e, megéltük-e egy Machaut, egy Dufay, egy Ockeghem, Binchois és a többiek újdonságát, nagyságát, jelentőségét? Vagy a hozzánk közelebb állónak érzett, és persze ismertnek

tételezett szerzők közül: ismerjük-e valóban Bachot, ha nem ismerjük – mert nem ismerjük – valamennyi kantátáját, vagy mit ismerünk valóban Mozartból, Haydnból, Beethovenból? Ha valaki önvizsgálatot tart, bizonyára megtalálja azokat a valódi nagyságokat, akiknek művészetéről csak mások leírása, véleménye alapján alkotott képet – s hol vannak akkor még a jelentékeny kismesterek, akik valóban csak egy-egy apró szegmentumában, de meghatározzák azt a folyamatot, amit zenetörténetnek hívunk?

Bartók esetében sem más a helyzet. A Bartók-kutatás bizonyos tekintetben túlművelt tudomány; századunk nagyjai közül aligha van még egy alkotó, akinek szinte minden napjáról el tudunk számolni, akinek levelezése ilyen mértékben fel lenne tárva, akiről ennyi visszaemlékezés látott volna napvilágot. Előadóművészi, zeneszerzői és népzene-tudósi munkássága számos tanulmánytárgya, s köteteket töltene meg azok az írások is, amelyek művészetének helyével foglalkoznak, tágabb kultúrtörténeti összefüggéseiben. Annyi adatot ismerünk már, hogy olykor az emberek az az érzése, az újabb adalékok már nem is az egészhez tesznek hozzá, hanem csupán a részleteket ámyalják tovább, egyre szubtilisebb, a kívülről számunkra egyre kevésbé érdekes vonásokkal. Korántsem azt akarom ezzel mondani, hogy a Bartók-kutatóknak nincs többé tennivalójuk; éppen ellenkezőleg: azért, mert ilyen gazdag dokumentáció áll rendelkezésünkre, lehetőségünk van arra, hogy

olyan kérdéseket is megfogalmazzunk, amelyek más, hasonló jelentőségű életművek esetében a forráskutatás hiányosságai miatt föl sem vetődhetnének.

Nem az a célom, hogy felsoroljam itt a Bartók-kutatás hiánylistáját, s nem is feladatom, hogy kijelöljem az elkövetkező időszak tennivalóit. Mindössze néhány terület legfontosabb kérdéseit vázolom a következőkben, tudva természetesen, hogy mindez csak az én személyes igényem, kívánságlistám vagy hiánylajstromom.

A tudományos feldolgozás jelen állapotának felmérése előtt azonban essék szó arról, ami a nagyközönségnek, vagy mondjuk így: a világnak Bartóktól a legfontosabb. Zeneszerzői életműve látszólag jó helyzetben van, bizonyos művei a legjátszottabbak közé tartoznak; nagyzenekar vagy jelentékenyebb karmester nem lehet meg anélkül, hogy ne tartaná repertoárján a *Concerto-t*, *A csodálatos mandarin-t*; vonósnégyesek rendszeresen műsorukra tűzik a hat kvartert, zongoristák sok darabját már csak költéséből is megtanulják. Mégis, feletébb szűkös ez az elismerés; sorolhatnók a soha nem játszott műveket – s főként, mintha nem volna átjárás az egyes műfajok között. Aki ismeri a zongoradarabokat, nem méri fel, hogy mennyi közös vonásuk van például a népdalfeldolgozásokkal, a dalok hányféleképp függenek össze a vonósnégyesekkel, vagy mennyivel többet ért meg a színpadi művekből az, aki a környező instrumentális műveket is ismeri. Illúzió lenne természetesen elvárni – különösen a szélesebb közönségtől –, hogy akár Bartóknak, akár más komponistának valóban teljes életművét ismerje, pedig valódi, érvényes képet csak az alkothat magának bármilyen műalkotásról, aki annak kontextusáról is eleget tud, aki számára nem ismeretlenek egy életmű arányai, belső összefüggései sem.

Bartók esetében ettől sajnos igen messze vagyunk. Külföldi hallgató számára kénysze-

rűen keveset mondanak a szöveges művek – nem csupán a szövegértés okoz itt gondot, hanem sokkal inkább például a népdalfeldolgozások zenei háttere, stílusa; egyáltalán: a Bartók zenéjét oly sok mindenben meghatározó népzenei indíttatás. Őszintén hozzá kell tenni ehhez, hogy mára sajnos a magyar hallgató vagy előadó sincs igazán jó helyzetben; hiába épül a magyar zeneoktatás mindmáig népzenei alapokon, ennek az oktatásnak általános iskolai hatékonysága elenyésző, a hivatásszerűen zenét tanuló is inkább csak a tárgy kötelező volta miatt sajátít el egyet s más a különböző népzeneiből. A népzene alapult zenei anyanyelv – Kodály meghatározó gondolata volt ez – mára bizonyosan illúzió vagy még inkább kudarcc. Vagy legyünk méltányosabbak: rossz történeti helyzetfelismerésből levont következtetés. Nagyon nehéz lenne persze megmondani, hogy milyen mértékben kell Bartók műveinek megértéséhez – vagy ami ezzel egyet jelent –, értő megszólaltatásához ismerni az általa felhasznált népzeneiket. Nyilvánvaló, hogy nem kell hozzá népzeneudósnak lenni, ám azon a szinten mindenképpen ismerni kell a magyar, román, szlovák népzeneit, hogy formai elveit, hangrendszerét, gesztusrendszerét, ékesítéseit értelmezni tudja az előadó, hiszen csak ezek birtokában jut el a kottaszöveg megfelelő olvasásához. Ez azonban azt jelenti, hogy nem elég néhány közismert népdalt tudni; sokkal fontosabb annak megismerése, hogy miként él, miként működik a népzene; mit jelent az, hogy csak változatok vannak, mérlegelni kell tudni, hogy mi az, ami mindegyik előadásban azonos, és mi az, amit alkalomról alkalomra ad hozzá a dalhoz az előadó. Manapság az érdeklődő ezt már csak felvételek tucatjainak gondos tanulmányozásával tudhatná meg. A népzene halott, abban a formájában legalábbis, amellyel Bartók találkozott, s amely számára életre szóló élményt jelentett. Szerencsére igen sok felvétel áll rendelkezé-

sünkre, s valóban van lehetőség arra, hogy aki igazán elszánt, nekivágjon az efféle munkának. Más kérdés, hogy elvárható-e bárkitől is ez a kutatás. És azt sem szabad elfelejteni, hogy az anyagismeret megszerzése és az eredmények általánosítása még igen messze van attól, hogy valakinek ez a tudás valóban zsigeri élményévé is váljék, s hogy tudását hasznosítani is tudja akkor, ha Bartóknak akár népdalalapú, akár attól függetlenül komponált darabjait akarja megszólaltatni.

Ez a kérdés persze korántsem egyedi, s nem is csak Bartók zenéjére vonatkozik: szembesül vele mindenki, aki bármely korábbi korszak zenéjével foglalkozik. A kotta ugyanis vajmi keveset közöl a ténylegesen lejegyzett zenei anyagról; minden kottairás csak egy adott tradíció ismeretében, annak szabályrendszerét elfogadva értelmezhető. Kis túlzással akár azt is mondhatjuk, hogy csak azt tudjuk valóban elolvasni, amit már tudunk; stílusismeret nélkül nincs kottaolvasás. Minél távolabb kerülünk egy komponista korától, minél áttételesebb a tradíció, annál több gondot okoz a leírt zenei anyag értelmezése – olykor már a legelemibb kérdéseken is fennakadunk. A Bartók halála óta eltelt idő is megtette a magáét; zenéjének számos eleme már nem magától értődő. Az ebből a felismerésből adódó konzekvenciák levonására azonban ez idáig kevés a meggyőző példa.

Ugyanígy komoly elméleti s gyakorlati kérdéseket vet fel a Bartók-játszotta felvételekből adódó tanulságok értelmezésének s felhasználásának kérdése. Sokak számára közhely, ám sokak számára elfogadhatatlan állítás, hogy Bartók Béla a XX. század egyik legnagyobb előadóművésze volt. Sajnos művészi rangjához képest csak igen kevés méltó körülmények között készült felvétele maradt fenn, azok is inkább véletlenszerűen. (Megmagyarázhatatlan, hogy a hangfelvételkészítés hőskorában miért nem figyeltek fel rá jobban a hanglemezcégek; sokkal több

felvétel készült nálánál jelentéktelenebb művészekkel; mintha a zenei ipar s az értékes művészet között mára oly élesen megnyilvánuló feszültség, sőt szakadék létrejöttére épp az ő előadóművészetének elsikkadása lenne az egyik legkorábbi s legmeggyőzőbb példa. Ha nem készültek volna amatőr felvételek, sejtelmünk is alig volna arról, hogy miként játszott ő Bachot, Beethovent, Lisztet... A zenei ízlés visszafordíthatatlan változásának jelét kell látni abban, hogy még mindig helyet kaphatnak olyan nézetek, hogy Bartók nem játszotta *jól*, s főként: a *legjobban* saját műveit – ha rangos előadóművészek nem érzik kényszerítő erejét annak, hogy az ő kevés felvételéből kiindulva kísérjék meg értelmezni mindazt, ami a kottában áll. (Az egyedüli példa Kocsis Zoltán páratlan vállalkozása, Bartók összes zongoraművének felvétele, amely valóban minden ízében átgondolt interpretációját, újjáértelmezését adja Bartók munkáinak – nem szolgálaián követve, hanem valóban lényegileg megértve azt, amit a kotta és a hangfelvétel együttes szemlélete jelent.)

Ki kell mondani, elfogultság nélkül, hogy minden Bartók által leütött hang: reveláció. Nem csupán a saját műveinek felvételeiről szólván igaz ez, hanem valóban mindegyik felvételére érvényes. Ha Bartók játékaról szövelünk, a kulcsmozzanat valószínűleg az, hogy kevesen értették olyan pontosan azt, hogy mi egy hangnak a zenei jelentősége, értelme, mint ő. Számtalanszor újrarahallgatva felvételeit, a hallgatónak az az érzése, hogy egyetlen egyszer sem tévedett, hogy minden zenei kérdésben igaza volt –, s ha valaki meri kockáztatni, hogy ízlését egy pillanatra aláveti a hallgatásból megszerezhető tapasztalatnak, ámulva veheti észre, hogy Bartók valóban kényszerítő erővel diktálja számára, hogy mit *hogyan* halljon. Nem utánzásra csábít, hanem elmélyülésre, s ugyanakkor szinte kényszerít az önvizsgálatra, a korábban már bevált megoldások felülvizsgálatára. Ha beszélhetünk előadóművészeti produkció kapcsán etikai imperatívusról, követelmé-

nyekről, akkor éppen Bartók művészete ennek legszebb példája. Számára nem létezik más, csupán a mű – annak minden mozzanatával, esetlegességével, a róla tudható-érzhető legapróbb, valójában szinte közölköztelen részletek szinte reflexszerű értelmezésével.

Azt hiszem, Bartók kapcsán éppen arról illik most szólni, hogy érzékileg legmegfoghatóbban éppen játéka az, ami művészetének, egész tevékenységének centrális kérdéseivel szembesít. Ahogyan a kotta szenvtelen-semleges jelzéseit érzéki valóságként fogalmazza meg, legyen az akár saját műve, akár másé, csak nagyon kevesek előadói teljesítményében figyelhető meg. Elképzeltető, hogy Bartókot hihetetlen mértékű népzene gyűjtői tapasztalat is segítette ebben, hiszen nap mint nap szembesítette a hangzó valóság és rögzített kottakép jószereivel feloldhatatlan ellentmondásosságával. Hogyan rögzíthető az, amit hallunk vagy elképzeltünk oly módon, hogy mások számára egyértelmű jelzéseként, követendő utasításként legyen érzékelhető? Valószínűleg kimondható, hogy népzenei lejegyzéseiben Bartók végső soron a mégoly pontos notáció kudarcával szembesült; amit hallott, még a maga végtelenül precíz lejegyzéseivel is csak hozzávetőlegesen közelíthette meg. Ám számára a notációs kérdésének igazi dilemmáját saját darabjainak lejegyzése jelentette: pontosan tudta, hogy amit partitúráiban lerögzített, olyképpen viszonyul a képzeletében élő ideális műalakhoz, mint a népdalok lejegyzése a fonográf-felvételekkel megörökített egyszerű előadáshoz. S nem volt oly naiv, hogy ugyanezt a szorító dilemmát ne érezte volna, ha mások műveit játszotta. A végső szót számára mindig a mű megszólaltatása mondta ki.

Érdekes módon a Bartók életművének megértését célzó tudományos kutatás nem követte őt ezen a radikális úton. Hiába mondhatjuk, hogy szinte mindent tudunk róla, az ismeretek mégsem állnak össze egésszé

– sőt, az utóbbi évtizedek Bartók-kutatása mintha éppen arról szólna, hogy óvakodni kell attól, hogy összekössük a szálakat. A következtetések levonásától húzódozik mindenki; mintha megkötné a kutatók kezét, s ami ennél sokkal rosszabb: megbénítaná a gondolkodását valami rosszul értelmezett tisztelet, félelem az illetéktelen kutakodástól, megmagyarázhatatlan szemérem akár a legev�idensebb, s éppen ezért néha a legrelevánsabb igazságok kimondásától.

Igaz, a legutóbbi időkig, s talán mindmáig, olyasfajta kontroll alatt áll a bartóki életmű vizsgálata, amelyre alig találni példát a kultúra történetében. A hagyaték jogi helyzetéből fakadóan a kutató patikamérlegben kényszerült mémi minden törekvést, minden apró eredményt, amely a tények megismerését, feltárását célozta – ha módja volt egyáltalán e tények megismerésére. A dokumentumok megosztottsága, zárt letétként való kezelése, bizonyos dokumentumoknak mindmáig való zárolása olyan helyzetet teremtett, amely nem kedvezett az elfogulatlan kutatómunkának; a jogtulajdonosok kontrollja s nem egy esetben vétőja olykor már neveltségéig menő eseményekhez vezetett – egészen a közelmúltig, amikor egy újonnan színre lépő örökös valósággal cenzúrázni kívánta s kívánja a maga nehezen elfogadható, sőt, inkább védhetetlen ízléskritériumainak megfelelően a bartóki életművel való foglalkozást. Érthető, ha valaki végrendeletében kiköti, hogy bizonyos személyes vonatkozású dokumentumok (például levelezés, naplók) csak bizonyos idő elteltével válhassanak ismertté a nagyobb nyilvánosság számára – akkor, amikor esetleg érintett személyek már nincsenek az élők sorában. Engedékenyebb szerzők huszonöt, mások ötven esztendőre engedélyeznek e zárolásra – így válhattak mára ismertté a szoborrá merevített Thomas Mann-képet jócskán átrajzoló naplók, vagy legújabban Elias Canetti nem kevésbé érzékeny témákat érintő feljegyzéseinek jó



része. Ám a szerzői jogi védelem közelmúltbéli meghosszabbítása olyan jogosítványokat adott a szerzővel olykor akár már semminő kapcsolatban nem lévő örökösöknek, hogy irreálisan hosszú ideig (szerencsére csupán 70 évig...) élhetnek vissza egy nagy szellem közkincsnek minősülő örökségével – s ki tudja, néha talán az idők végtelenjéig is, hiszen semmi sem akadályozhatja meg akár a dokumentumok megsemmisítését, vagy akár újabb, immár akár feloldhatatlan zárolását. Bartók levelezése esetében ennek valószínűsége nem is csekély – még ha szerencsésebb széljárást remélve hallgat is róla mindenki, mint a sír.

A Bartók-kutatás története legjobban talán a tragikomédia műfajában lenne megírható. Sokszor a legjobb s legméltóbb erőfeszítések fulladtak kudarcba vagy értek felemás véget, s majd minden esetben kimutatható lenne az esendő irigység, hiúság, féltékenység. Sok mindent lehet persze a politikai helyzet rovására írni – azt azonban, hogy Bartók művészetét nem csupán zenészek asszisztálásával, hanem egyenesen szinte kezdeményezésére vágta évekre pozitív s negatív szelre a politikai vezetés, nem lehet letagadni. *Egyszerűbb* volt így tenni, mint farkasszemet nézni azzal, amit műve jelentett a közvetlenül utána következő generáció számára... A bartóki életmű elméleti megközelítésére tett, hosszú ideig egyedüli kísérletnek, a Lendvai Emődének sorsa is ezt példázza; egyszerűbbnek s biztonságosabbnak tűnt megpróbálni szakmailag és politikailag lehetetlenné tenni, sárba döngölni, mint megkísérelni megérteni, hogy miről beszél – vagy netán hasonló színvonalú másik elméletet szögezni vele szembe. S ezzel az eljárással immár fél évszázada sikerült egy olyan máig érinthetetlen pontot kijelölni a magyar zene-tudomány-történet számára, amely valóban szinte lehetetlenné teszi ezen elméletnek tudományos megítélését.

Többnyire azonban mégis azt a kicsinyességet lehet észrevenni a dolgok mélyén,

ami azoknak a reagálását jellemezte, akikre ez a hatalmas hagyaték rá volt bízva. A Bartók-életrajz elhivatott kutatójának, levelei első felkutatójának s publikálójának sorsáról mostanáig inkább csak szemérmes szemlesütéssel mer bárki szólni: Demény János kutatómunkájának értékelését nem végezte el senki, s (kiadatlan) szakmai önéletrajzát is könnyű valamiféle sértődöttség dokumentumának tartani, semmint felismerni a mögötte rejlő személyes tragédiát, a munkája akadályoztatásából fakadó kényszerű szakmai fiaskót. Mái hallgatás övezi azt is, és talán soha nem lesz elmondva az egész történet, hogy miért s hogyan történhetett, hogy egy igencsak közepes szakmai kvalitású tanárember válhatott a magyarországi Bartók-kutatás hivatalosan első emberévé, a Bartók Archívum „alapítójává” s vezetőjévé; magyar nyelvtudás nélkül érzékeny dokumentumok feldolgozójává s közlőjévé, zenei judíciumok hiányában máig gyalázatos állapotban lévő kottakiadványok közreadójává, tudományos színben feltűnő, ám olykor már-már a nevésségesség határáig félrevezető és megbízhatatlan könyveknek a lektorálhatatlanságig menően érinthetetlen szerzőjévé. Denijs Dille Bartók-kutatásának története megírásra vár – e sorok írója máig érzi jobb keze kézközépcsontján annak a vonalzóélel történet erőteljes ütésnek a fájdalmát, amit a MTA Bartók Archívuma egykori vezetője mért rá egy általa sértőnek vélt, még kritikainak is alig minősíthető megjegyzés miatt...

Nem lehet véletlen, hogy a dokumentáció zároltsága, csak kevesek számára lehető, bizalmas hozzáférhetősége, a taktikai szempontok tiszteletben tartása miatt Bartók művészetének vizsgálatában a filológia kapta a főszerepet, legalábbis az utóbbi évtizedekben. (Ne feledjük: az utolsó, új szempontokat érvényesítő Bartók-pályakép negyedszázada készült – azóta mind a tudományos szemléletben és módszerekben, mind a minket körülvevő világban oly jelentős változások

történetek, amelyek legalábbis szükségessé, ha nem elengedhetetlenné tennék egy új Bartók-pályarajz és értékelés kidolgozását.) A filológia természetesen égetően szükséges: a művek jobb megértését, hitelesebb kottaszöveg kialakítását, a munkamódszer feltárását teszi lehetővé. S valóban, a Bartók-filológia olyan csúcsteljesítményt mutathat fel, ami a század klasszikus alkotóinak munkásságát tekintve talán csak Schönbergnek jutott ki ezidáig; Somfai László könyvei s erőfeszítése egy kritikai Bartók-összkiadás létrehozására csak az egyetemes zenetudomány legjobb eredményeihez mérhető. A Bartók-hagyaték jogi helyzete azonban máig lehetetlenné tette – s talán még tíz esztendeig, a művek jogi védettségének megszűntéig – nem is teszi lehetővé ezen összkiadás megindítását – megint csak kicsinyes szempontoknak rendelve alá a Bartók-életmű jobb megismerésének egyetemes szempontját. (Arról nem is szólva, hogy a forgalomban lévő régebbi kiadások sokszor pontatlanok és hibásak, a legújabb, Bartók Péter által javított kiadványok sorozata is inkább tetézi a problémákat, s prolongálja megoldásukat.)

A Bartók-kutatás voltaképpen Bartók halála óta a *várakozás* állapotában leledzik; hol ezért, hol amazért nem volt mód arra, hogy elfogulatlan vizsgálatok kezdődjenek s kerüljenek nyilvánosságra, hogy nézőpontok ütközzenek s vitákban csiszolódnak egymástól talán nem is oly távol álló nézetek. Túlművelt tudomány – de eredményei csupán részeredmények, amelyek néha csak az értelmezés határáig jutottak el; nincs átfogó kézikönyv, katalógus, amely tájékoztatna a nyilvánosan hozzáférhető dokumentumok összefüggéseiről; nincsenek érvényes tudományos interpretációk, csupán egyes részterületek alapos dokumentálásánál – de nem értékelő feldolgozásánál – tartunk. S itt meg kell említeni egy látszólag mellékes körülményt. A Bartók-kutatás, minden tetszetős felszín ellenére, csupán

illuzórikusan internacionális diszciplína. Még ha adatközlés szinten vagy szigorú zenefilológiai területeken mutathatnak is fel eredményeket külföldi kutatók, igazán jelentős felismerésekre a XX. századi magyar viszonyok mélyreható ismerete nélkül nem lehet jutni. Ha a Bartók-kutatásnak van valóban sürgető feladata az elkövetkező években, akkor az (a mégiscsak belátható végű filológiai munka folyamatos végzése mellett) a történeti kontextusban elhelyezett bartóki életmű vizsgálata és interpretálása. Ezt a magyar társadalomtörténet, folklórtörténet, kultúra alapos ismerete, feldolgozása, átélése nélkül aligha végezheti el bárki – egyelőre azonban a kezdeti lépések megtevétele sem történt meg; a Bartók-kép voltaképp közhelyes motívumokból tevődik össze. Pedig Bartók nem elszigetelt jelensége korának, nem független a magyar szellemi áramlatoktól – csak éppen fel kellene tárnai az összekötő szálakat, elfogultságoktól mentesen értékelni a fontosabb kapcsolódási pontokat, még ha azok néha nem erősítik is azokat a vonásokat, amelyekkel a köztudatban élő Bartók-portrét generációk óta rajzolják. (Itt lenne az ideje a magyar kultúra egyik legbizarrabb motívuma, az úgynevezett „Bartók-modell” történelmi lomtárba való száműzésének is.)

Természetesen a Bartók-életműről vallott nézetek revidálásához csaknem valamennyi tevékenységi körének újbóli megvizsgálása szükséges. Aligha lehet tovább halogatni a népzene tudós munkájának tudományos feldolgozását: valamennyi eredményét, elvét, nézetét s egész gyakorlatát azzal a szemmel nézni, ami olyan tudományos teljesítményt illet, amely mára teljességében a tudománytörténet része; fél évszázad múltával tudni lehet, hogy szinte valamennyi felismerése, következtetése korrekcióra szorul, lévén egy adott pillanatbeli állapot rajza, s bármily jelentős volt is mindez megfogalmazásának idején, ma csak alapos

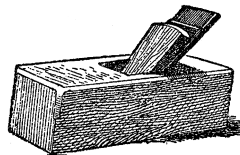
kritikával használható, szembesítve az azóta született eredményekkel. (Bármennyire kívánatos is, hogy végre megjelenjék magyar népdalrendszerezésének hatalmas korpusza, tudni kell, hogy az semmiféle hatással nem lehet, nem lesz a népzene tudomány mai fejlődésére – egy nagy elme működésének imponáló dokumentuma, amelyet legfőlegb dallamgyűjteménynek szabad használni, példatárnak, de semmiképp sem ma is érvényes eredménynek vagy kiindulópontnak a további kutatásokhoz.)

S nem odázható el a zeneszerző munkásságának új szempontú vizsgálata sem. A Bartók-életmű tagolódásának, periódusainak, egymásra vonatkozásainak leírása legalább négy-öt évtizede görgetett örökség; de megkockáztatható, hogy nyomaiban Kodály 1921-es interpretációjáig vezethető vissza. Alig történt releváns kísérlet arra, hogy feltárja a művek esetleg éppily érvénnyel kimutatható, ám más hangsúlyokkal dolgozó összefüggésrendszerét; kevesen vállalkoztak csak arra, hogy Bartók munkásságát elhelyezzék a huszadik század zenetörténetében úgy, hogy ne csupán a fővonallhoz – a „kánonhoz” – igazodjék, hanem megmutatkozzanak rejtettebb kapcsolatai is; ideje lenne megvizsgálni azokat az interpretációkat is, amelyek a bartóki mű jelentőségéről és szerepéről szólnak, s amelyeknek oly kevés megértés jutott osztályrészül az elmúlt évtizedek debattáns vagy kritikátlan írásaiban. (Adorno

zenetörténeti perspektíváit, Leibowitz elhíresült cikkét éppúgy fel kellene dolgoznia végre a Bartók-kutatásnak, mint azokat a művekben is tetet öltött zenei ideákat, amelyek Bartók kapcsán fogalmazódtak meg az őt követő generáció nyugat-európai, később látványosan más utakat járó képviselőinek gondolkodásában.) Az elméleti megközelítéseknek is tág tere nyílik még; mindaddig, amíg az elméleti leírás a Lendvai-kérdéssel való küzdelmet érzi legfontosabb feladatának, aligha történik elmozdulás a mai holtpontról. Ha megjelenne végre az az évtizedek óta mitikus ködben tartott elemző munka, amelyre hallomásból sokan hivatkoznak ugyan, de csak kevesek tudják, hogy mi áll benne (s ők is csak a szerző, Simon Albert mára sajnos egyre halványuló emlékként élő elbeszéléséből), talán az ezirányú kutatás is elmozdulna végre a holtpontról.

Vannak tehát, nem is kis számban, ismeretlen területei annak az univerzumnak, amit Bartók életműve képvisel. S ha sok részről bizonyosodik be, hogy térképe megrajzolható, vagy legalábbis átrajzolható, akkor valamiképpen az egészről is új képet kell alkotni. Nem tehetünk méltányosabb, szerényebb és munkára jobban kötelező kijelentést, mint azt, hogy a feladat előttünk áll.

Kulcsszavak: *Bartók, zenetudomány, kutatástörténet, Bartók-kutatás, Bartók-hagyaték, Bartók-recepció*



# Tanulmány

## NÉHÁNY GONDOLAT A MATEMATIKÁRÓL

Kroó Norbert

az MTA rendes tagja – kroo@office.mta.hu

George W. Bush, az Egyesült Államok elnöke legutóbbi, az Unió helyzetéről tartott beszédében meghirdette az *Amerikai versenyképességi kezdeményezés* című programot, amelyben lényeges költségvetési növekedést javasolt az alapkutatások területén, különös tekintettel a matematikai és fizikai tudományokra.

Ebben a javaslatban kiemelkedő fontosságot kapott tehát a matematika és a természettudományok oktatása mint az oktatás minőségének javítása érdekében teendő alaplépés. Azért tervezzük a „matematika most az általános iskola diákjainak” és a „matematika most a gimnáziumok diákjainak” programok beindítását, hogy ígéretes és kutatáson alapuló módszerek vezessenek be a matematika oktatásába, és előkészítsék a diákokat a magasabb színvonalú matematikai kurzusokra.

Ez a fejlemény, továbbá több olyan beszélgetés tanulságai, amelyeket nemzetközi részvétellel folytattam, indítottak arra, hogy fizikusként a matematika fontosságáról fogalmazzak meg néhány gondolatot, a teljesség igénye nélkül.

A fizikai kurzusokat gyakran a régi görögökkel kezdjük, de igaz ez a matematikára is. Pitagoraszra hivatkoznék, akinek fő ér-

deme nem (a mások által valószínűleg már korábban megfogalmazott) a derékszögű háromszögekre érvényes  $a^2+b^2=c^2$  tétel, hanem a bizonyítás gyakorlatának bevezetése a matematikába.

A pitagoraszi iskolára jellemző a számok mindenképp fölé helyezése. A régi görögök meg voltak győződve arról, hogy a számok jelentik a kulcsot a világegyetem titkainak megismeréséhez. De jellemző volt rájuk a geometria analitikai megközelítése is. Persze nem ismerték a negatív és komplex számokat, de igazolták az iracionális számok, mint a  $\sqrt{2}$  létezését. Ez utóbbi annyira zavarta őket, hogy titokban tartották a felfedezésüket. Sőt, az is előfordult, hogy azt a kollégájukat, aki ezt „kikotyogta” – elnémították.

Pitagoraszt elbűvölte a zene is, különösen a zene és a számok kapcsolata. A kifeszített húr hosszát megfelelően az első felharmonikust kaphatjuk meg és így tovább. Vagyis a zene matematika (is). A hangokat (frekvenciákat) számok hányadosaiként írták le. Úgy gondolták, hogy a csillagászattól a zenéig a számok minden felvetendő kérdésre választ adnak.

E felfogás modern változata ma is megfigyelhető. Magam is csodálattal szemlélem azt a tényt, hogy a matematika, mint az emberi gondolkodás talán legelvontabb termé-

ke, az anyagi világ minden jelenségének leírására képes.

A matematika volt az emberiség történelme során kialakult első, a szó szoros értelmében vett tudomány. Minden „régí” társadalom fejlesztette és megpróbálta mindennapi problémái megoldására alkalmazni. Használták az ókori kultúrák nagy építkezésein, a babiloniak nyilvántartásaiban, amelyeket a modern könyvelés elődjének tekinthetünk, az egyiptomi és maja piramisok terveinek kialakításában, és a hieroglifák vagy pontvonalas jelek is alkalmasak voltak számolási feladatok megoldására.

Az indiaiak rájöttek a  $\pi$  szám „titkaira” az algebra fejlesztése során, és a kör területéhez és területéhez köthető kapcsolatra is. Ismerjük azon kínai, indiai és japán erőfeszítéseket is, amelyek a szám minél pontosabb kiszámítására irányultak. Kínában egyébként mindig is a tízes számrendszert használták, és egyes források szerint a zérus fogalmát is ismerték. A tízes számrendszer hozzánk indiai közvetítéssel kerülhetett.

Az aritmetika és geometria már a görögök által is kiterjedten művelt diszciplínáinak egyesítése, az algebra kultúrából nőtt ki. Igaz, hogy már a babiloniak és a görögök is sikerrel birkóztak meg a másodfokú egyenletek megoldásával, de a középkori arab világnak sikerült az indiai numerikus algebra és a görög geometriai algebra egyesítése útján sokkal előbbre jutni. Magasabb rendű egyenleteket is meg tudtak oldani, de fontos fejlemény az exponenciális és logaritmus fogalmak (és jelölések) bevezetése is. És még meg sem említettük a negatív és az imaginárius számokat!

Ebben az időszakban a fejlődés Európában megtorpant, aminek mai szemmel nézve furcsa magyarázata van.

A rómaiak számrendszerének komoly hiányossága a zérus szimbólum hiánya volt. Ez a tízes számrendszerben a 13. sz.-ban jelent meg Indiában. A zérus fogalma nélkül sokmindent

nem lehetett volna megtenni a csillagászatban, a fizikában, a kémiában vagy az ipari folyamatok modellezésében. De a rómaiak rendszerét az aritmetikai műveletek (szorzás stb.) elvégzésében is nehéz használni.

Éppen ezért kritikussá vált, hogy 1259-ben Európa jelentős részében megtiltották a zérus szimbólum használatát, mint a nem keresztény kultúrából importált jelet. Ennek eredményeként a matematika fejlődése több évszázadig elmaradt, örököül hagyva például egy sor abszurd mértékrendszert. Napóleon mértékrendszer-refomja is ennek felismerésén alapult; egyébként azt is felismerte, hogy a matematika fejlődése és a gazdaság fejlődése között szoros kapcsolat fedezhető fel.

Talán a 16. századtól kezdődően indult az európai matematika fejlődésnek, többek között arab forrásokra alapozva, például magasabb rendű egyenletek megoldásával, az oszthatatlanság módszereinek bevezetésével, amely a Leibniz-féle infinitezimális módszer elődje lehetett. A polinomok matematikáján keresztül vezethetett az út az integrál- és differenciálszámítás felé. De Bolyai János és Nyikolaj Lobacsevszkij munkái a geometriát is új alapokra helyezték, mint ahogy Bolyai az édesapjának írt levélben arról beszélt: „egy új világot teremtettem”.

A 19. és 20. század matematikájának hősei Sir William Rowan Hamilton, David Hilbert, Arthur Cayley, John Canton, Kurt Gödel, Neumann János, Alan Turing és még sokan mások teremtették meg a modern matematika azon gazdag eszköztárát, amely azt nemcsak korunk természettudományának, hanem mindennapi életünk szinte minden folyamatának alapjává tehető.

Ha ezt a még ilyen rövid összefoglaló alapján is csodálatos fejlődést végiggondoljuk, akkor néhány általános következtetést mindenképpen megfogalmazhatunk. Az első megállapítás az lehet, hogy a matematika fejlődése a különböző kultúrákban sok hasonlóságot mutat. Ez valószínűleg az

emberi agy képességeiben gyökerezik és a számokkal és geometriai mennyiségekkel való munkában valósul meg. Sok jel utal arra, hogy az ember „matematikára programozva” születik. A matematika nemcsak a problémák kvantitatív megoldásának, de egyúttal az emberi gondolkodás formálásának eszköze is. A matematikai gondolkodás evolúciós előny, a sikeres vadászat, a modern társadalmak alapját képező munkamegosztás és együttműködés, a logikus tervezés eszköze. Korai megjelenését az egyén fejlődésében a csecsemők pont-vessző képekre való reagálását felmérő kísérletek is igazolják. Ezért a gyermekfejlődés minél korábbi szakaszában kezdődő matematikaoktatás (elsősorban numerikus problémák feloldása formájában) alapvető fontosságú. Ezért is óriási hibánaktartom, hogy gyermekeink „kalkulátor fertőzöttek”, nem, vagy csak igen korlátozottan sajátítják el a fejben számolás képességét, ami matematikai analfabetizmushoz vezethet.

Mindezek alapján tehát kijelenthető, hogy a matematika fejlődése az egyén gondolkodásának fejlődésén keresztül párhuzamos a társadalmak fejlődésével. Ez áttételesen azt is jelenti, hogy a tények előbb vagy utóbb, de mindig győznek, hiszen a tények mögött számok rejtőznek. Az új tudományos felfedezések is csak akkor győzhetnek, ha számokká redukálhatók.

Az előzőekből következően kijelenthető – és ezt támasztják alá a történelmi tapasztalatok is –, hogy a felfelé ívelő társadalmak fejlesztik, használják és magas szinten oktatják a matematikát, a lefelé ívelők pedig elhanyagolják az oktatást, különösen a matematika (és az ehhez szorosan kapcsolódó természettudományok) területén.

Ezt a tényt ismerte fel az Amerikai Egyesült Államok politikai vezetése is (természetesen a gazdasági és tudományos elit nyomására), és hirdette meg a már említett versenyképességi kezdeményezést.

De hadd hivatkozzam a múlt század arculatát alapvetően befolyásoló világhírű

magyar tudósok példájára. A néha „marslakóként” emlegetett Wigner Jenő, Teller Ede, Neumann János, Szilárd Leó, Gábor Dénes és a többiek tevékenységét a matematika és a természettudomány (esetükben elsősorban a fizika) szoros kapcsolata jellemezte. Eredményeik bizonyítják, hogy a matematika minden tudomány gyökere – Pitagoraszról Wigner Jenőig –, a nagy felfedezések alapja.

Mivel a technológia és fejlődése a tudományon alapul, a tudomány pedig a matematikán, közvetve a technológiai (és gazdasági) fejlődés alapja is a matematika fejlődése és alkalmazása. Ezért Napóleon azon kijelentése, hogy a matematika fejlődése és tökéletesítése végeredményben az államok prosperitásával hozható kapcsolatba, talán még soha sem volt olyan fontos és időszerű, mint napjainkban, amikor a gazdasági fejlődés a technológiai megújuláson, újabb, a kutatásban gyökerező technológiák megjelenésén és bevezetésén, az innovációs lánc lerövidítésén és az innovációs folyamat felgyorsulásán dől el.

Térjünk vissza egy gondolat erejéig a görögökhöz. Korábban a matematika gyökerei tárgyalásánál Pitagorasz nevét és iskoláját említettem, most egy valamivel későbbi kor óriását, Platont szeretném megidézni. Platón a pitagoraszai tanokra épített, de például nem osztotta annak a számok mindenhatóságán alapuló filozófiáját. Viszont a matematikát az emberi elme elképzelhető legjobb „edzési” módszerének tartotta. Iskolája bejáratát *A matematikában tudatlanoknak a belépés tilos!* felirat díszítette. Azzal is továbblépett elődjénél, hogy a valószínűséget is a matematika fogalmai közé emelte. Azt hirdette, hogy ha egy problémával kapcsolatban nem vagyunk képesek tökéletesen egzakt és szelfkonzisztens megoldást találni, megelégedhetünk olyanokkal is, amelyek valószínűek.

Ez utóbbi áll közel a modern kvantummechanikai gondolkodáshoz is, ezért nem meglepő, hogy Wemer Heisenberg és mások is szívesen nyúltak vissza a platóni filozófia gyö-

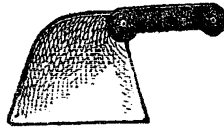
kereihez. A kvantummechanikai gondolkodás a korábban megszokottól gyökeresen eltérő jellegére jó példa Albert Einstein esete, aki nem hitt a folyamatok valószínűségi jellegében. Ismert mondása, hogy „Isten nem kockajátékos”, ezzel megkérdőjelezte a kvantummechanika valószínűségeken alapuló értelmezését. De egy másik kijelentése kevésbé ismert. Azt mondta, hogy ha a kvantummechanika ilyen, az nagyon furcsa. Erre pedig a legutóbbi évek kísérleteinek fényében, anélkül, hogy a részletekbe belemerénénk csak egyet mondhatunk: valóban nagyon furcsa, de igaz.

Az eddig elmondottaknak természetesen hazánk számára is van üzenete. Mint akár az USA-ban, akár másutt, nálunk is a fel-

emelkedés és így a versenyképesség kulcsa csak a matematikai és természettudományos oktatás és természetesen kutatás erősítése lehet. Kell, hogy fiatalajaink újra érdeklődéssel forduljanak e területek felé, hogy újra hangadók legyenek a nemzetközi versenyeken, hogy megbecsüljük a felkészítést végző tanárokat, és vonzóvá tegyük a hazai kutatói pályát. És az is kell, hogy minél több honfitársunk sajátítsa el a matematikai gondolkodás azon szintjét, amely választott szakmája művelését magasabb színvonalon teszi lehetővé.

---

Kulcsszavak: *matematika, alapkutatás, versenyképesség, bizonyítás, valószínűség, zérus, gazdasági fejlődés, gondolkodás-formálás, technológia*



## LAX PÉTER ÉLETÉRŐL ÉS MUNKÁSSÁGÁRÓL

Fritz József

az MTA rendes tagja

Lax Péter Dávid akadémikust igazából nem is kellene bemutatni, mindannyian ismerjük. Évek óta rendszeresen látogat Magyarországra, számos alkalommal élvezhettük lényegretörő előadásait.

Budapesten született 1926. május elsején. Matematikai tehetsége igen korán megmutatkozott; olyan kiváló tanítómesterei voltak, mint König Dénes, Péter Rózsa és Turán Pál. Mindez a harmincas évek fordulóján történt, a magyar történelem rendkívül sötét, vészterhes időszakában; a Lax család is okkal emigrált az Egyesült Államokba, 1941-ben. Lax Péter rövidesen a New York-i Egyetem hallgatója lett, doktori címét is igen hamar, 1949-ben megszerezte. Kezdeti lépéseit Szegő Gábor segítette, első tudományos dolgozatát tizennyolc évesen publikálta Erdős Pál egy problémájához kapcsolódóan. Későbbi, de még fiatalkori dolgozatai közül többnek maga Richard Courant és Kurt Otto Friedrichs is társszerzője.

Tanulmányainak befejezése után, 1945–46-ban, majd a doktorátus megszerzése után ismét egy évig Los Alamosban, a *Manhattan-terv* keretében dolgozott. 1951-ben visszatért New York egyetemére, ahol folytatta és kiteljesítette Neumann János kezdeményezését a gázdinamika egyenleteinek elméleti és számítógépes vizsgálatát illetően. Azóta is a Courant Intézet professzora, az 1972–1980-as időszakban igazgatója is volt. Az intézet számítóközpontja vezetőjeként sok konkrét feladat megoldásában vett részt. Kiemelkedő tudományos teljesítményének

elismeréseként számos tekintélyes tudományos testület választotta tiszteletbeli tagjának, köztük a Szovjet, a Francia és a Kínai Tudományos Akadémia is. Tucatnyi neves egyetem díszdoktora, legfontosabb kitüntetései közül néhány: Chauvenet-díj (1974), Norbert Wiener-díj (1975), National Medal of Science (1986), Wolf-díj (1987), Leroy Steele-díj (1992), Abel-díj (2005).

Hatvan tennékeny év tudományos eredményeit lehetetlen hitelesen ismertetni, Lax Péter több mint kétszáz dolgozatára a legszerényebb számítás szerint is legalább háromezer hivatkozás érkezett. Munkái nagy részét egyedül jegyzi, Ralph Phillips a legkedveltebb társszerzője, de Robert D. Richtmyer, Arthur Milgram, Cathleen Morawetz, Burton Wendroff, Louis Nirenberg, James Glimm, Charles David Levermore és Andrew J. Majda nevét is meg kell említeni. Több elismert tankönyvet, terjedelmes összefoglaló tanulmányt és monográfiát is írt. A teljesség igénye nélkül néhány nagyobb témakört emelnék ki munkásságából.

Kidolgozta a megmaradási elvek hiperbolikus rendszereinek általános elméletét, ezzel vette kezdetét a gázdinamika egyenleteinek máig sem lezárult, szisztematikus vizsgálata. Napjainkban ez a témakör leginkább talán az időjárás megbízható rövid távú előrejelzésének igénye miatt izgalmas. A lökeshullámok tárgyalása és az elmélet középpontjában álló Lax-féle entrópiaelv a valós folyamatok visszafordíthatatlanságának magyarázatához is hozzájárul.



A fentiekhez kapcsolódóan dolgozta ki a nemlineáris hiperbolikus egyenletek numerikus – számítógépes megoldásának alapelveit, amiből a Friedrichs-Lax- és a Lax-Wendroff-eljárások a legismertebbek. Itt kell kiemelni, hogy Lax Péter elévülhetetlen érdemeket szerzett a színvonalas számítógépi kultúra kialakításában és népszerűsítésében.

Ralph Phillips társszerzővel közös cikkekben és első könyvükben a hiperbolikus rendszerek szóráselméletének egységes kereteit hozták létre, különös tekintettel a hullámegyenlethez és az atomfizikában kulcsfontosságú Schrödinger-egyenlethez kapcsolódó alkalmazások kérdéseire. Az automorf függvények szóráselméletéről készült második monográfiájuk anyaga spektrumában túllép ezeken, még a számelméletből ismert Riemann-sejtés is belefoglalható az elméletbe.

A Korteweg-deVries-egyenletből kiindulva kidolgozta az integrálható rendszerek általános elméletét, ami támaszkodik a szóráselmélet módszereire is. Az első integrálok (megmaradási elvek) rendszerének áttekinthető elemzése itt teljessé válik ki, de ezek a gondo-

latok a többi területen is jelentős szerepet játszanak. Maguk az eredmények pedig a szolitonok ma oly népszerű elméletének kiindulópontjává váltak.

A fentebb vázolt témák közül talán a hiperbolikus rendszerekkel és numerikus megoldásukkal kapcsolatos eredmények váltották ki a legnagyobb visszhangot. Ezt a terület közvetlen gyakorlati jelentősége, valamint a problémák elvi nehézsége egyaránt indokolja; a többi eredmény sem kevésbé eredeti és tartalmas. Lax Péter a függvénytan és a funkcionálanalízis számos más területén is maradandót alkotott.

Kevés olyan tudós van, aki olyan nagy hatást gyakorolt volna a modern tudomány fejlődésére, mint Lax Péter. Életműve megtestesíti a matematika hármasságban megvalósuló egységét: az elméleti, az alkalmazott és a számítógépi matematika együttlését.

A szöveg az MTA III. Osztályának 2005. november 4-én, a Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából rendezett rendkívüli ülésén elhangzott előadás szerkesztett, kissé kibővített magyar nyelvű változata.



## A jövő tudósai

Tisztelt Olvasó!

A kutatók utánpótlásával – fiatal tudósokkal foglalkozó melléklet tizenötödik számában folytatjuk a fél évvel ezelőtt megkezdett vitát a jövő tudós nőinek egyenlő esélyeiről. E számban *Baranyainé Réti Gabriella* és *Koósné Török Erzsébet* az Országos Tudományos Diákköri Tanács tapasztalatait ösz-szegzik a fiatal tudós nők szerepéről a tanács által rendezett Országos Tudományos Diákköri Konferenciákon, valamint a Pro Scientia

aranyérmesek körében. A rovat második felében a Kutató Tanárok Országos Szövetségének megalakulásáról és célkitűzéseiről adunk hírt. Kérjük, ha a nők tudományban betöltött helyzetével vagy az ifjú kutatókkal kapcsolatos témában bármilyen vitázó megjegyzése vagy javaslata lenne, keresse meg a melléklet szerkesztőjét, Csermely Pétert a [csermely@puskin.sote.hu](mailto:csermely@puskin.sote.hu) email címen.

*Csermely Péter*

az MTA doktora

(Semmelweis Egyetem,  
Orvosi Vegytani Intézet)

---

### A FIATAL TUDÓS NŐK AZ ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIÁKON ÉS A PRO SCIENTIA ARANYÉRME- SEK KÖRÉBEN

A tudományos diákköri mozgalom – építve a magyar iskolaiügyben mélyen gyökerező önképzőköri tevékenység átörökíthető, tiszteletreméltó hagyományaira – ezen a néven már több mint fél évszázada jelen lévő tehetséggondozási forma. A TDK tevékenység a minőségi értelmiségi képzés fontos területe, a tehetséggondozás egyik legjelentősebb formája a hazai felsőoktatásban. Alapja a kötelező tananyag elsajátításán túlmutató hallgató-tanár műhelymunka, szakmai kapcsolat, amely már az alapképzés idején lehetőséget ad a hallgatóknak az önálló alkotó tevékenységre, egy-egy tématerület és az alkalmazható kutatási módszerek, eszkö-

zök mélyebb megismerésére, a kötelezőn túlmutató új ismeretek megszerzésére. Ezzel egyrészt hozzájárul a hallgatók tudományos kutatói pályán való elindulásához, másrészt az intézmények oktatóinak, kutatóinak lehetőséget ad a szakmai utánpótlás megismerésére, felkarolására, a PhD-képzésre jelentkezők érdemi kiválogatására.

Ma már az ország szinte minden felsőoktatási intézményében folyik tudományos és művészeti alkotó diákköri munka. Jelentős tudományos diákköri műhelyek működnek. Az Országos Tudományos Diákköri Tanács (OTDT) a központi adatbázisában több mint 260 műhelyt tart nyilván, ez a kör több ezer hallgatót és oktatót, kutatót foglal magába. A hallgatók közel 20 %-át. A hallgatók az intézményi konferenciákon mutathatják be kutatási eredményeiket, majd intézményi jelölés, a bíráló zsűri javaslata alapján lehetőséget kaphatnak az Országos Tudományos Diákköri Konferencián (OTDK)

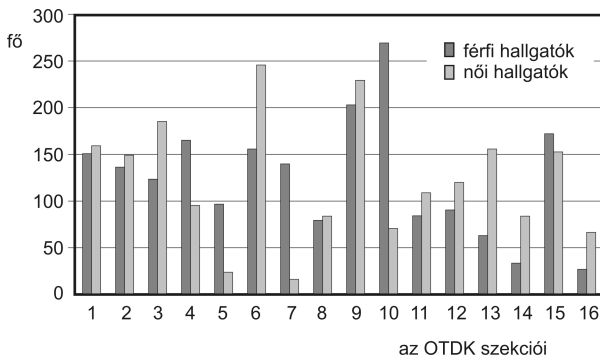
való részvételre. (A konferencia szabályairól részletesen az aktuális felhívás szól.)<sup>1</sup> A két-évente megrendezésre kerülő konferencia a hallgatói tudományos munka és művészeti alkotói tevékenység megmértetésének szervezett formája, amelyen részt venni szakmai, tudományos elismerés és egyben nagy lehetőség, ösztönzést ad a további, sokszor nem kis áldozatot kívánó kutatómunkához mind a hallgatóknak, mind az oktatóknak. A tizenhat szekcióban tartott konferenciát egyre nagyobb nyilvánosság mellett szervezi az Országos Tudományos Diákköri Tanács.

Az OTDT kétévente, az országos konferenciákhoz kapcsolódóan Pro Scientia Aranyérem pályázatot hirdet meg a kimagasló hallgatói tudományos teljesítmény elismerésére. A kitüntetést 1989-ben ítélték először oda, majd ezt követően kétévente a negyvenöt legkiválóbb hallgató kaphatja.

<sup>1</sup> A XXVIII. OTDK 2007 tavaszán kerül megrendezésre. Felhívása megtalálható a [www.otdt.hu](http://www.otdt.hu) címen.

(2003-tól két Pro Arte Aranyéremet és egy Junior Pro Scientia Aranyéremet is odaítél az OTDT.) Az odaítélésnek szabályzatban rögzített ügyrendje van, körültekintő, többlépcsős odaítélési eljárással történik (bővebben lásd a Pro Scientia Aranyérem kitüntetés szabályzatát (PSA Szabályzat, 1987).

2005-ben, a XXVII. OTDK-ra 3569 dolgozatot neveztek, a dolgozatokat író, befogadott hallgatók száma pedig 3925 volt, melyből 49 %-ot nők tettek ki. Sulyok Katalin *A fiatal tudós nők helyzete a kutató középiskolások között* című, a *Magyar Tudomány* oldalain megjelent tanulmányában megfogalmazza, hogy a tudomány iránti érdeklődés terén középiskolás korban még nem mutatkozik különbség, a kutató diákok pontosan fele lány (Sulyok, 2005). Az OTDT számadatai alapján is az állapítható meg, hogy ez az arány a felsőoktatásban, a tudományos diákkörökben tevékenykedő hallgatók esetében nem változik, a nemek



1. ábra • A XXVII. OTDK-ra befogadott hallgatók nemenkénti megoszlása az OTDK szekciói szerint – A tanulmányban található valamennyi grafikon esetében az OTDK szekcióinak számmal történő megjelölése az alábbiakat jelenti: 1. Agrártudományi Szekció; 2. Állam- és Jogtudományi Szekció; 3. Biológia Szekció; 4. Fizika, Földtudományok és Matematika Szekció; 5. Hadtudományi Szekció; 6. Humán Tudományi Szekció; 7. Informatika Tudományi Szekció; 8. Kémiai és Vegyipari Szekció; 9. Közgazdaságtudományi Szekció; 10. Műszaki Tudományi Szekció; 11. Művészeti és Művészettudományi Szekció; 12. Orvostudományi Szekció; 13. Pedagógiai, Pszichológiai, Közművelődési és Könyvtártudományi Szekció; 14. Tantárgypedagógiai és Oktatástechnológiai Szekció; 15. Társadalomtudományi Szekció; 16. Testnevelés- és Sporttudományi Szekció

tekintetében a számarány kiegyenlített. Azonos érdeklődéssel vesznek részt a TDK-munkában a férfiak és a nők (vö. KSH-adat: 1990-ben a felsőoktatásban végzett hallgatók 48,8 %-a nő, 2001-ben pedig 53,8 %-a). Az egyetemisták és főiskolások körében a különbséget, az arány változását véleményünk szerint később kell keresni, a Pro Scientia aranyérmesek szintjén.

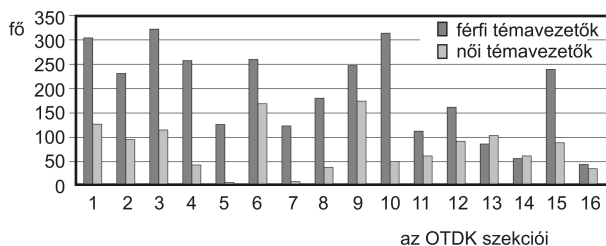
Megfigyelhető, hogy a tudományos diákköri konferenciákon az egyes tudományterületeken belül a nők részvétele általában magasabb. A XXVII. OTDK-ra befogadott hallgatók nemenkénti megoszlását az OTDK szekciói szerint vizsgálva, láthatjuk, hogy a nők aránya kiugróan magas a humán tudományok és a közgazdaságtudomány területén (1. ábra). Alacsony részvételi arány a fizika, földtudományok, matematika területén és a műszaki tudományok területén látható, valamint két területen nagyon alacsonynak mondható a részvétel: a hadtudományban és az informatikában. Mindez párhuzamba állítható a *Magyar Tudomány* a jövő tudós nőiről szóló vitaindító tanulmányában említett tudományterületek közötti különbségekkel, miszerint a társadalomtudományokban magas, viszont a mérnöki területeken nagyon alacsony a nők részvétele (Papp – Groó, 2005).

Az OTDK-ra befogadott hallgatók témavezetőinek esetében fordított az arány, összességében csak 29% a nő, és szinte minden tudományterületen alacsonyabb számban

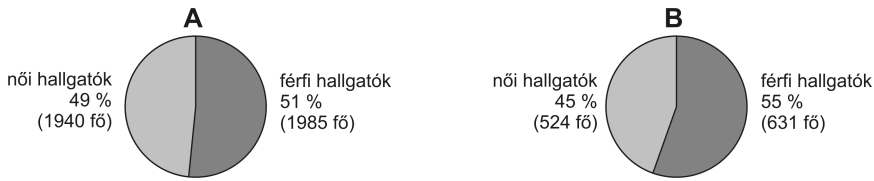
vannak jelen, mint a férfiak. Két kivétel van: a Pedagógia, Pszichológia, Közművelődési és Könyvtártudományi Szekció, valamint a Tantárgypedagógiai és Oktatástechnológiai Szekció, azonban ez nem jelentős különbséget takar. Hasonlóan a hallgatók nemenkénti megoszlásához a hadtudomány és az informatika területén igen alacsony a női témavezetők száma (2. ábra). Ez az arány a középiskolás kutató diákok női mentorainak kutatási területén is megfigyelhető a pedagógia, pszichológia és az informatika viszonylatában (vö. Sulyok Katalin fent említett tanulmánya). Ismét csak felmerül a kérdés, hogy mi az oka annak, hogy a nők számaránya a kutatásban az életkorral egyre csökken.

A részvételi adatokkal párhuzamosan fontosnak tartjuk vizsgálni a konferencia helyezett hallgatóinak (I., II. és III. helyezés) nemenkénti megoszlását. A helyezések viszonylatában a nemek közti arányok ugyan nem jelentősen, de eltolódnak látszanak. A helyezett hallgatóknak ugyanis már csak 45 %-a nő (3. ábra).

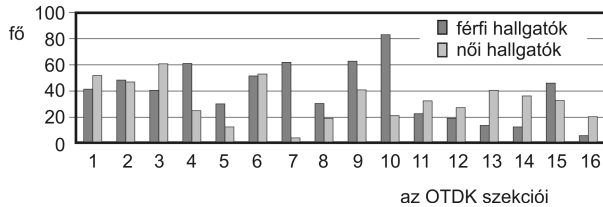
Az egyes szekciókat vizsgálva kiugróan magas a nők helyezéseinek száma a férfiakhoz viszonyítva a biológia, a pedagógia, pszichológia, közművelődés és könyvtártudomány, a tantárgypedagógia és a testnevelés területén. A részvételi adatok alapján a nők magas helyezésszámát a Humán Tudományi Szekcióban és a Közgazdaságtudományi Szekcióban vártuk leginkább, azonban humán területen azonos a nemek aránya, köz-



2. ábra • A XXVII. OTDK-ra befogadott hallgatók témavezetőinek nemenkénti megoszlása az OTDK szekciói szerint



3. ábra • A – A XXVII. OTDK-ra befogadott hallgatók nemenkénti megoszlása; B – A XXVII. OTDK helyezett hallgatóinak (I., II. és III. helyezés) nemenkénti megoszlása



4. ábra • A XXVII. OTDK helyezett hallgatóinak (I., II. és III. helyezés) nemek szerinti megoszlása szekciónként

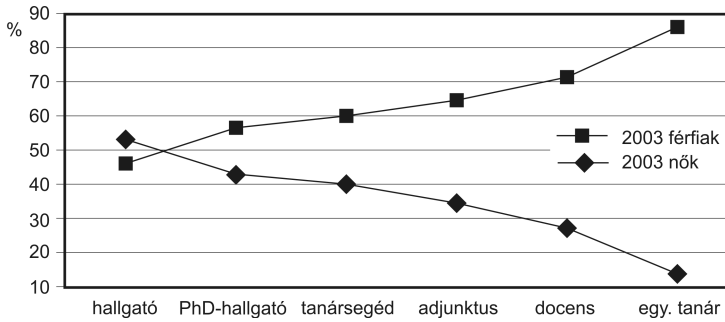


5. ábra • A – A Pro Scientia aranyérmes férfiak és nők aránya 2005-ben; B – A Pro Scientia aranyérmes férfiak és nők aránya 1989-től 2005-ig

gazdaságtudományi területen pedig számuk jelentősen elmarad a férfiakhoz viszonyítva. Alacsony helyezésszámok a Fizika, Földtudományok és Matematika Szekcióban, az Informatika Tudományi Szekcióban és a Műszaki Tudományi Szekcióban tapasztalhatók, ami a részvételi adatokkal összhangban áll (4. ábra).

A konferencián szereplő, valamint a helyezést elért nők arányához viszonyítva meglepő képet mutat a Pro Scientia Aranyérmesek nemenkénti megoszlása. Míg a XXVII. OTDK-n dolgozatukat bemutatók közel fele nő, addig a 2005. évi aranyérem-kitüntetetteknek már csak 40%-a, a teljes aranyérmes csoportnak pedig (1989-től 2005-ig kittedést kapott 425 fő) csak 29%-a (5. ábra).

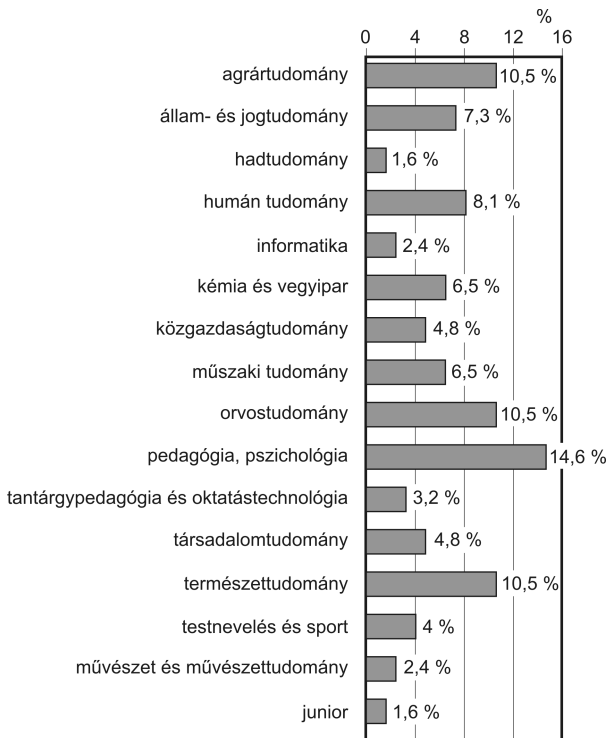
Az adatok szerint: míg a tudományos diákkörökben tevékenykedő hallgatók körében nem látunk jelentős különbséget férfiak és nők között, addig ez a különbség fokozódni látszik a helyezett hallgatóknál, és erőteljesen megjelenik az aranyérmesek között. Mint említettük, a Pro Scientia aranyérem hallgatói összeteljesítményt ismerel (OTDKI. helyezés, ezen felül kiemelkedő tudományos diákköri teljesítmény, diákköri nyilvánosságon túlmutató dokumentált tudományos eredmények, publikációs tevékenység, nyelvvizsgák, kimagasló tanulmányi eredmény). A nemek közötti különbség – úgy véljük – itt jelentkezik először a tudományos életútban, mintha példázna ez az időszak a Papp–Groó-tanulmányban (2005) említett „olló” nyílását (6. ábra). A



6. ábra • Nők és férfiak tipikus akadémiai karrierje Magyarországon, 2003

TDK-munka és a Pro Scientia Aranyérem pályázat időszakát a pirossal jelölt terület mutatja (mint látjuk, itt nyílik szét az „olló”). Véleményünk szerint annak okát, hogy az akadémiai karrier során „elfogynak” a nők, és számuk a „piramis” tetején alacsony, már ebben

az időszakban keresni kell. A Pro Scientia aranyérmesek teljes körét tekintve a nők arányát tudományterületenként vizsgálva, hasonló számarányokat tapasztalhatunk, mint az OTDK-n részt vevő tudományos diákkörös hallgatók körében (7. ábra, vö. 1. ábra).



7. ábra • Az 1989-től 2005-ig Pro Scientia Aranyérem kitüntetésben részesült nők OTDK-szekciók szerinti megoszlása

Különösen alacsony a női aranyérmesek száma a hadtudomány és az informatika területén, az összes aranyérmes csupán 1,6 és 2,4 %-a. (Megjegyzés: a Művészeti és Művészettudományi Szekcióban látható alacsony női arány, valamint a Junior Aranyérem még alacsonyabb aránya abból adódik, hogy ezen a területen kitüntetést még csak két alkalommal adományoztak. Szám szerint ez a művészet területén összesen három nőt, a juniorok között pedig két nőt jelent.) Legmagasabb a nők aránya a pedagógia, pszichológia, közművelődés és könyvtártudomány területén (14,5 %), ezt követi az agrártudomány, az orvostudomány és a természettudomány (10,5 %). A férfiak számát két területen haladja meg a nők részvétele: a pedagógia, pszichológia, közművelődés és könyvtártudomány

esetében, valamint a testnevelés és sporttudomány területén. A Pro Scientia aranyérmes nők akadémiai karrierje további vizsgálatokra lenne érdemes.

Kapcsolódva a Papp Eszter – Groó Dóra (2005) jövő tudós nőiről szóló vitaindító tanulmányában olvasható ajánlásokhoz, valamint a *Magyar Tudományban* (2006/2) közzétett hozzászólásokhoz, támogatjuk a kapcsolati pontok létrehozását a női kutatók támogatására, akár országos szervezet, bizottság formájában, egyetértünk olyan programok kezdeményezésével és megvalósításával, amelyek a tudományos pálya lányok számára vonzóbbá tételére, a tudós nőkkel szembeni előítéletek elleni fellépésre irányulnak. Úgy gondoljuk, feladatához mérten ezen törekvések megvalósításához a tudományos diákkörök szintjén az OTDT is be tud kapcsolódni. A fentiek mellett:

- A tudományos pálya vonzóvá tétele érdekében erősítjük a minőségi felsőoktatás sajátos jegyeit, a nagy múltú és értékes hagyományokon tovább élő tudományos és művészeti diákköri munkát, országos képviseléssel, széleskörű támogatással, pályázati lehetőségek biztosításával.
- A 2007 tavaszán rendezendő XXVIII. OTDK Társadalomtudományi Szekciójában *Társadalmi nemek kutatása* címmel új tagozatot hirdetünk, várva azon dolgozókat, kutatási eredményeket is, amelyek a nők tudományos pályán érvényesülő esélyeit, az azt befolyásoló tényezőket

tárják fel. Összegyűjtjük az utóbbi három konferencián bemutatott, ezen témakört feltáró dolgozatokat.

- Az OTDT kiadványaiban (*Diáktudós, Almanach, OTDT és Mindentudás Egyeteme* honlap stb.) tudományos és alkotó művészeti diákköri munkát végző kiemelkedő képességű hallgatói példákat – köztük női életutakat – mutatunk be, olyanokat, amelyek tudományos teljesítményekre ösztönöznek, tudományos teljesítményt ismernek el.
- Az OTDT, kutatási programjához illeszkedően, folytatni kívánja a Pro Scientia aranyérmesek munkaerőpiaci helyzetének és tudományos életútjának vizsgálatát – diplomamunka keretében a téma már feldolgozásra került (Réti, 2004) –, benne külön elemezve a Pro Scientia aranyérmes nők szakmai karrierjét, tudományos életpályáját.

Az OTDT Titkárság adatainak elemzésével, a leírt gondolatokkal kívántunk hozzájárulni a feltett kérdés megválaszolásához, a helyzet megoldásához, a legszükségesebb lépések viszonylag gyors megtételéhez, hogy a nők helyzete javuljon, szerepük növekedjen a magyar tudományos életben.

*Baranyainé Réti Gabriella*  
humán szervező, OTDT szakreferens  
titkarsag@otdt.ph.hu

*Koósné Török Erzsébet*  
könyvtár–informatikus, az OTDT tikára  
titkarsag@otdt.ph.hu

## IRODALOM

- A XXVII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia felhívásának dokumentumai, 2005. tavasza (2004): Az Országos Tudományos Diákköri Tanács közleményei 4. Budapest
- A nők helyzete a magyar tudományban – Hozzászólások (2006): *Magyar Tudomány*. 2. 224–227. p.
- Almanach (2005): *Pro Scientia aranyérmesek és Mesertanárok*. Tudományos Diákköri Füzetek. Országos Tudományos Diákköri Tanács kiadványa. Bp.
- Diáktudós (2004): Az Országos Tudományos Diákköri Tanács időszaki kiadványa. XVIII, 1–2., Bp.

- Központi Statisztikai Hivatal (2002): *Kutatás és fejlesztés*. Ladányi Andor (2002): A diplomások száma és összetétele. Statisztikai elemzés. *Educatio*. XI, 2.
- Nők a tudományban (három tanulmány) (2002): *Magyar Tudomány*. 163, 3, 332–340.
- Országos Tudományos Diákköri Tanács honlapja: <http://www.otdt.hu>
- Papp Eszter – Groó Dóra (2005): A nők helyzete a magyar tudományban. *Magyar Tudomány*. 166, 11, 1450–1454.
- Pro Scientia Aranyérem kitüntetés szabályzata. (A szabályzatot az Országos Tudományos Diákköri

Tanács 1998. április 28-i ülésén fogadta el.) A Pro Scientia Aranyérem szabályzata megtekinthető az Országos Tudományos Diákköri Tanács honlapján (<http://www.otdt.hu>) vagy az *Országos Tudományos Diákköri Tanács Közleményei* 3. füzetében. Réti Gabriella (2004): *A Pro Scientia aranyérmesek munkaerőpiaci helyzete és részvétele a tudományos*

*életben*. Diplomamunka. Pécsi Tudományegyetem TTK Felnőttképzési és Emberi Erőforrás Fejlesztési Intézet, Pécs (A tanulmány megjelent a *Magyar Tudomány* 2005. márciusi számában: 345–359.)

Sulyok Katalin (2005): A fiatal tudós nők helyzete a kutató középiskolások között. *Magyar Tudomány*. 166, 11, 1454–1456.

EGY MOZGALOM  
A KUTATÓ TANÁROKKAL  
A KUTATÓ TANÁROKÉRT  
– *Megalakult a Kutató Tanárok  
Országos Szövetsége* –

Tíz évvel ezelőtt alakult meg az a mozgalom ([www.kutdiak.hu](http://www.kutdiak.hu)), amely lehetőséget biztosít középiskolás diákok számára magas szintű kutatómunka végzésére felsőoktatási intézményekben és kutatóhelyeken. Egy évtized alatt csaknem tízezer kutató diák kapcsolódott be a munkába. Ennek támogatására megalakult a Kutató Diákokért Alapítvány és a Kutató Diákok Országos Szövetsége. A tehetséges középiskolásokat foglalkoztató kutatóhelyek számos magyarországi városban elérhetőek. A mozgalmat támogató mentorok Ausztriában, Kanadában, Romániában, Szerbiában és az Amerikai Egyesült Államokban is megtalálhatóak. A kutatható területek igen sokrétűek az élő természettudományoktól a társadalomtudományokig, így minden középiskolás megtalálhatja a számára érdekes, fontos és örömet nyújtó témát. A diák egy életre szóló élményt és tapasztalatokat szerezhet azáltal, hogy bekapcsolódhat az életkorának megfelelő módon egy kiváló szakmai csoport munkájába, vagy nemzetközi tudományos folyóiratban társszerzőként lehet jelen. A legjobbak minden évben részt vehetnek a Tudományos Diákkörök Országos Konferenciáján (TUDOK), ahol személyesen is beszámolhatnak kutatási eredményeikről és sikereikről. A mozgalmat erősíti és segíti a Magyar Innovációs Szövetség ([www.innovacio.hu](http://www.innovacio.hu))

által minden évben kiírt Ifjúsági Tudományos és Innovációs Verseny. A kutató diák mozgalom egyik erkölcsi elismerése, hogy e két megmérettetés valamelyikén sikeresen szerepelt fiatalok többletpontokat szerezhetnek felsőoktatási továbbtanulásukhoz. Nagy megtiszteltetés a mozgalom számára, hogy mentorai között a Nobel-díjas Oláh György kémikus éppúgy megtalálható, mint csaknem kétszázan a Magyar Tudományos Akadémia levelező és rendes tagjai közül. A mentorok listáját tartalmazó könyv minden év tavaszán az összes hazai és környező országbeli magyar középiskolába eljut, és több mint ezer kutató középiskolás személyesen is megkapja. A diákok kiválasztásában alapelv, hogy a mentorlista olyan diákok kezébe kerüljön, akik már valahol bizonyítottak, vagy akikre a környezetük felfigyelt. Ebben és a diákok kutatómunkájának koordinálásában hangsúlyos szerephez jutnak a közoktatásban dolgozó tanárok.

A Kutató Diákokért Alapítvány 1999-től Tehetségsegítés címmel rendszeresen konferenciákat rendezett a hazai és a határainkon túli magyar iskolákban tanító azon középiskolai tanárok számára, akik elkötelezett hívei és segítői a mozgalomnak. A tanárok munkájának segítésére 2004 elején internetes virtuális tanári munkacsoportok alakultak a kutató tanár fogalmának és küldetésének definiálására és azoknak a feltételeknek a megfogalmazására, amelyek a középiskolai tanári munka mellett a hatékony tehetséggondozás és képességfejlesztés kialakításához szükségesek. A *Tehetséggondozás 2004* konferencián a munkacsoportok állásfoglalásai alapján



felmerült az az elképzelés, hogy a Kutató Diákok Országos Szövetségének mintájára alakuljon meg egy olyan tanárszövetség, amely összefogja az eddig is aktívan kutató és a diákokat segítő pedagógusokat. Egy év előkészítő munka után 2005 decemberében jött létre a Kutató Tanárok Országos Szövetsége. Közel százötven alapító tagja van a mozgalomnak. A szövetség tagjai olyan tanárok:

- akik a nevelő-oktató munkájuk mellett kutatómunkát is végeznek, ideértve, hogy rendszeresen publikálnak, tudományos konferenciákon és fórumokon vesznek részt. Számos példa van arra, hogy a tanár a diákkal együtt végzi a kutatómunkát, mintegy szakmai vezetőjeként, irányítójaként;
- akik a tanító-oktató tevékenységük mellett pedagógiai tapasztalataikkal azokat a tanítványaikat segítik, akik valamely tudományterületen elmélyült kutatómunkát folytatnak. Elsősorban nem szakmai segítséget vagy újabb tanítási elemeket adnak át, hanem olyan készség- és képességfejlesztést folytatnak, amely a felnövekvő diákokban a kutatói attitűdhez szükséges értelmi és érzelmi fejlődéshez járul hozzá;
- akik a nevelő-oktató munkájuk mellett tantárgypedagógiai kutatásokat végeznek, oktatási segédanyagokat és módszereket fejlesztenek és dolgoznak ki, tankönyveket és oktatást segítő kiadványokat írnak, szerkesztenek.

Az utóbb leírt három szempont alapján lehet körülírni a kutató tanár fogalmát. Természetesen ezek nem szigorú kategóriák, és elképzelhető, hogy egy pedagógus akár mind a három területet magas színvonalon műveli, illetve az említett tevékenységek természetes módon összefüggenek egymással. A szövetség alapító tagjai között vannak olyan kutató tanárok, akik végzettségüket tekintve nem pedagógusok, de munkájuk során számos ponton kapcsolódnak a fenti

tevékenységi formákhoz, és elkötelezett hívei a mozgalomnak, továbbá rendszeresen foglalkoznak kutató diákokkal.

A Kutató Tanárok Országos Szövetségének elsődleges célja a kutató középiskolás tanárok összefogása és szakmai fórumok biztosítása számukra. A célok között kiemelt fontosságú a hazai és a határon túli kutató tanárok számára történő segítségnyújtás, illetve szervezett formájú érdekképviselők biztosítása. Az idei év februárjában rendeztük meg a Kutató Tanárok II. Konferenciáját, amelynek a székesfehérvári Lánczos Kornél Reálgymnázium adott otthont. A konferencia célja az volt, hogy egy műhelymunka keretében kialakítsa a szövetség hosszú távú koncepcióját. Olyan célok és tervek fogalmazódtak meg, amelyek a kutató tanárok érdekeit és a mozgalom célkitűzéseinek minél szélesebb körű megismertetését szolgálják. A Kutató Tanárok Országos Szövetsége

- évente kétszer – tavasszal és ősszel – meg fogja rendezni a Kutató Tanárok Konferenciáját, amelyek műhelymunkákkal és előadásokkal fogják elősegíteni a tanárok közötti kapcsolatteremtést és a kutatási eredmények megismertetését;
- a kutató tanárok publikációs tevékenységének érdekében internetes folyóiratot indít el a [www.kuttanar.hu](http://www.kuttanar.hu) oldalon;
- a kutató diákok mentorlistájához hasonlóan létrehoz egy hasonló adatbázist azon egyetemi oktatók és kutatók neveivel, akik az adott intézményben kutatási lehetőséget biztosítanak középiskolai tanárok részére;
- részt vesz az egyetemi tanárképzés továbbfejlesztésében, segítve a pályakezdő középiskolai tanárokat a kutatási módszertan elsajátításában, segítve a tudományos diákkörök szervezését, támogatva a közoktatásban dolgozó tanárok doktori fokozatának megszerzését;
- fellép a tanárok számára biztosítandó

olyan kutatási feltételek megteremtéséért és bővítéséért, például a kutatói nap, illetve munkájukat támogató tudományos pályázati lehetőségek létrehozása;

- javaslatok megfogalmazásával és azok képviselésével az Oktatási Minisztérium és a kutatási-költségvetési szféra felé ellátja a kutató tanárok érdekképviseletét;
- a fentiekén túl a szövetség feladata a kapcsolatépítés és a kapcsolatok ápolása a határon túli magyar és nemzetközi pedagógiai társaságokkal, egyesületekkel is.

Mindkét mozgalom védnökségét Sólyom László köztársasági elnök, Magyar Bálint oktatási miniszter és Vizi E. Szilveszter, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke vállalták el. A mozgalommal kapcsolatos anyagok és fejlemények a Kutató Tanárok Országos Szövetségének honapján ([www.kuttanar.hu](http://www.kuttanar.hu)) folyamatosan nyomon követhetők. A kutató tanár mozgalom a tehetséggondozás új színtere lehet a kutató középiskolás diá-

kok eredményesebb nevelése és oktatása érdekében, és így a közoktatásban dolgozó kutató tanárok tudományos eredményei nagyban hozzájárulhatnak hazánk tudományos megítéléséhez.

*Fodor Erika*

ELTE Trefort Ágoston Gimnázium, vezető középiskolai tanár, OM és közoktatási szakértő  
Kutató Tanárok Országos Szövetsége, alelnök  
[efodor@mail.datanet.hu](mailto:efodor@mail.datanet.hu)

*Kiss Gábor*

Kutató Tanárok Országos Szövetsége, koordinátor,  
[kiss@kutdiak.ph.hu](mailto:kiss@kutdiak.ph.hu)

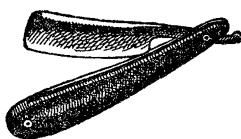
*Kolostyákné*

*Pljesouszki Zsuzsanna*

Szentannai Sámuel Mezőgazdasági Szakközépiskola, Gimnázium és Kollégium, középiskolai tanár, Kutató Tanárok Országos Szövetsége, alelnök, [sztannai@extemet.hu](mailto:sztannai@extemet.hu)

*Lagzi István László*

ELTE TTK, Kémiai Intézet, tudományos munkatárs,  
Kutató Tanárok Országos Szövetsége, elnök  
[lagzi@vuk.chem.elte.hu](mailto:lagzi@vuk.chem.elte.hu)



## Megemlékezés

Tudományos munkássága során Szablya professzor az elektromechanikus energia-átalakítás általános teóriáját dolgozta ki, és alaptanulmányokat folytatott a nem-lineáris elektromágneses erőkkel kapcsolatosan. A Washingtoni Állami Egyetemen tagja volt az első olyan tanácssoportnak, amely már akkor környezetvédelmet tanított, amikor még csak az első kurzusokat állították össze ebben a szakmában.

Szablya János fejlesztette ki az Energiagazdálkodás és tervezéstantárgyát a WSU-n, ezt sok éven át tanította is. Vendégprofesszor volt a Braunschweigi Műegyetemen, a The University of the West Indies-en, Trinidadban és a University of Washington, valamint a Seattle University-n. Sok előadást tartott az energiáról és annak a kultúrához való viszonyáról. A mérnöki kamara tagja volt az USA hét államában és két kanadai provinciában. Száznegyvennél több tudományos cikke jelent meg. Mind az amerikai, mind a magyar *Ki Kicsoda*-ban szerepelt.

Szablya János családját tartotta élete legnagyobb teljesítményének. Gyászolja felesége, Ilona – aki a Magyar Köztársaság tiszteletbeli konzulja, a Washingtoni Sajtószövetség volt elnöke –, hét gyerekük és tizenhat unokájuk.

Szablya János a Washingtoni Állami Egyetem professor emeritusa volt, és mint nyugdíjas professzor továbbra is tanított. A Magyar



**SZABLYA JÁNOS  
FERENC**

(JOHN SZABLYA)  
1924 – 2005

Tudományos Akadémia külső tagja volt, az Institute of Electrical and Electronics Engineers *Fellow*-ja. A Cleveland-i Árpád Akadémia aranyérmes tagja volt, és tagjai közé választotta a Sigma Xi Tudományos Kutató Társaság. Tanácsadó mérnökként is dolgozott; a nemzetközi kereskedelmi és mérnöki tanácsadással, fordítással foglalkozó Szablya Consultants Inc. alelnöki funkcióit is ellátta.

Budapesten született, édesapja, Szablya János, a Ganz gyár igazgatója, majd az Iparművészeti Társulat elnöke volt, aki nagy művészi

és iparművészeti gyűjteményt állított össze. Édesanyja, a feminista Huszár Alexandra, szobrász volt. Mindkettőjükre a magas ideálok voltak jellemzőek, fiukat művészettel, művészekkel, gondolkodó és tevékeny emberekkel, könyvekkel és zenével körülvéve nevelték. 1939-ben szüleivel az USA-ba utazott, ahol édesapja rendezte a New York-i világkiállítás magyar pavilonját. Szablya János tanulmányait Magyarországon fejezte be. A háború alatt – mint műegyetemi hallgatót – nem hívták be katonának, és így érvessztés nélkül fejezte be tanulmányait. A József Nádor Műszaki és Közgazdaságtudományi Egyetemen kapott gépészmérnöki diplomát. Elvégezte a Gazdasági Szaktanárképzőt is, és közgazdaságtudományból doktorált. Az ostromot Budapesten élte át – „szerencse, időzítés és Isten segítségével”.

A háború utáni szovjet elnyomás erős antikommunizmust váltott ki belőle – ő kezdettől fogva „kozmetopolita hazafi” volt. Már akkor is a személyes szabadságban és a kulturális különbözőségben hitt, amikor az még nem volt beszédtema. Hitt az egyéni felvilágosodásban, a kollektivismust mint sötétséget vetette el.

A Ganz Villamosági Gyárban kezdett dolgozni, ahol annak idején az ország elektromos hálózatának helyreállításán fáradoztak. Közben tanított a Műegyetemen, először rész munkaidőben, azután adjunktusként főállásban. 1951 júniusában feleségül vette Bartha-Kovács Ilonát. Mindketten sokat írtak: cikkeik, műveik száma jelentős.

1956 őszén, miután a szovjetek leverték a forradalmat, Szablyáék három kis gyerekükkel elhagyták az országot. Bécsben a Soproni Erdőmémőki Egyetemen kaptak munkát, majd segítettek az egyetemet Vancouverbe áttelepíteni. Szablya azonnal felvételt nyert a British Columbia Egyetem angol karára, ahol, mint azelőtt a Műegyetemen, gépészetet tanított. Szablyáék segítettek megalapítani a vancouveri magyar katolikus templomot.

Szablya János Ferenc élete a szabadság, a család, a tudás és a hit jegyében zajlott.

Egész életében kutatott az újjó megoldások után, minden kihívás csak jobban felkeltette kíváncsiságát. Impozáns személyiségét Isten kedves, örömteli természettel áldotta meg. Olyan ember volt, akinek lényege a becsület, a szeretet, az együttérzés. Őt országban dolgozott, és mindenütt otthon érezte magát. Hét politikai rendszerben élt élete folyamán, és minden hibája ellenére az amerikai demokráciát tartotta a legjobbnak.

Szeretett férj, édesapa, fiú, mentor, tudós, filozófus és barát volt, szkeptikus, optimista, szórakoztató – egyaránt értett a tudományhoz és a művészethez. Ismerte és gyűlölte a háború borzalmait, de tűrhetetlennek találta az olyan békét, amelynek a személyes szabadság az ára. Ősei kiváló technikai, újjó



érzékét, művészetét és ízlését is továbbadta gyerekeinek.

Életének végső analizisében írta, hogy a hitnek és a tényeknek együtt kell élniük, mivel szoros összefüggésben vannak egymással; hogy a Nyugat történelme és előrehaladása a jövőben Krisztusból, az Istenemberből ered majd. Végül azt a kérdést vetette fel, hogy vajon az emberiség visszafelé fog-e haladni az alapstagnálás felé, amit a gonosz forrásának látott, vagy az a bölcsesség fog győzni, amely a szeretetet progresszívnek fogja fel, amely mindig fiatal, érdeklődő, gondozó és kifelé irányuló. Szerinte a szeretet a válasz, de a választást az utókorra bízta. Ezzel az utolsó leckével búcsúzott.

*Helen (Ilona) Szablya*



# Kitekintés

## VÍZ AZ ENCELADUSON

Az Enceladus a Szaturnusz harmincöt, névvel bíró holdja között a hatodik legnagyobb, átmérője 504 km. A Szaturnusz széles és diffúz, kék színű E-gyűrűjében mozog, valószínűleg belőle származik a gyűrű anyaga. A Cassini űrszonda 2005. februárban ezer, márciusban ötszáz, júliusban 168 km magasan repült el felette. A mérési adatokat, a következtetéseket a *Science* március 10-i számában tizenegy tanulmányban tették közzé.

Földi megfigyelésekből és a Voyager felvételeiből feltárult az Enceladus jeges és változatos felszíne. Idős kráterek váltakoznak rajta nemrég felszínre került jégfolyásokkal. A Cassini kutatói remélték, hogy sikerül valamilyen aktivitást, esetleg jégvulkanizmust közvetlenül megfigyelni. Korábban három olyan helyet ismertünk a Naprendszerben, ahol aktív vulkanizmus létezik: a Föld, a Jupiter Io holdja és a Neptunusz Triton holdja. Az Enceladus első két megközelítése során készített felvételeken gyűrődéses hegyeket, hátságokat és töredezett felszínű jeges síkságokat láttak, a síkságokat sötétzöld szerves anyaggal szennyezett csíkok szabdalják, ezeket „tigriscsíkoknak” nevezik a kutatók. A magnetométer az Enceladus atmoszférájából kiszökő ionokat észlelt, a második megközelítés során a déli pólusnál lokalizáltak erős kiáramlást. Ezért a harmadik megközelítésnél a déli pólushoz irányították a Cassini űrszondát, 168 km magasságban repült keresztül a déli pólus feletti gázfelhőn. A déli pólus környéke ma is aktív, a felszínt a kriovulkanizmus és frissen hullott hó alakítja. Az árapályerők feltördelték a felszíni jeget.

Infravörös hullámhosszon nézve fényes a déli pólus, a felszíni „tigriscsíkok” alól vízpára, jég és porszemcsék tömke gejzírhez hasonlóan a felszínre. A kilövellés víz mellett szén-dioxidot, metánt, nitrogént és propánt is tartalmaz. A feltörő anyag mennyiségét másodpercenként legalább 150 kg-ra becsülik. Az ionok az atmoszférából kilépnek a bolygó magnetoszférájába és az E-gyűrűbe. Annyi víz kerül ki, hogy az az egész szaturnuszi rendszerbe eljut. Oxigén jelenlétét a Cassini már a Szaturnuszhoz közeledve kimutatta, eredetét akkor nem értették.

Nagy meglepetés és magyarázatra vár, hogy egy kis hold ennyi geológiai aktivitást mutat. A belső hó eredete sem ismert egyelőre. Vízpáracsóva akkor jelentkezik, ha a víz felforr vagy szublimál. Ammónia lehetne a fagyásgátló, de a jelenlétét eddig nem észlelték. A felszín alatt folyékony víz lenne, vagy ammónia is lenne a felszín alatt? A Naprendszer más holdjain km-es jégréteg alatt lehet folyékony víz, az Enceladuson talán csak néhányszor tíz méteres jégréteg borítja. Kérdés, mióta tart a most megfigyelt aktivitás; egész története során aktív volt a hold? Lehetett esély az élet kialakulására, megjelenésére?

2008 tavaszán a Cassini ismét megközelíti az Enceladust, a terv szerint 350 kilométerre.

Cassini at Enceladus. Special Section. *Science*. 10 March 2006. **311**, 1389–1428

NASA's Cassini Discovers Potential Liquid Water on Enceladus. *NASA News*. 9 March 2006. release: 06-088

Cassini felvételek, a program részletei: <http://www.nasa.gov/cassini>, <http://saturn.jpl.nasa.gov>

J. L.

## FORRÓ KÖRNYEZETBEN SZÜLETTEK A JEGES ÜSTÖKÖSÖK?

Március közepén a Lunar and Planetary Science konferencián közölték az első, előzetes eredményeket a Stardust űrszonda által gyűjtött üstökösanyag összetételéről. Az eredmények nem illenek bele az üstökösök keletkezéséről, a Naprendszer kialakulásáról alkotott képbe.

A Stardust űrszondát 1999. február 7-én indította útjára a NASA amerikai űrügynökség. 2004. január 2-án került sor a küldetés legfontosabb részére: a szonda 300 km-re megközelítette a Wild-2 üstökösöt, anyagmintákat gyűjtött, és felvételeket készített. Ezután a szonda hazaindult, a pomintákat tartalmazó kapszula ejtőernyővel ért sikeresen földet idén január 15-én. Az űrszonda 4,6 milliárd kilométert tett meg csaknem hét év alatt, hogy végül kb. egy milligramm port juttasson a Földre.

A Wild-2 „újonc” a Naprendszer belső tartományaiban, ezért különösen érdekes a kutatók számára. Milliárd évekig az Uránuszéhoz hasonló távolságban keringett a Nap körül. 1974-ben úgy repült el a Jupiter mellett, hogy az óriásbolygó gravitációs tere megváltoztatta a pályáját, az üstökös a Naphoz közelebb vezető pályára tért át. A Stardusttal való 2004-es találkozása előtt mindössze ötször jár napközben, tehát kevés anyag párolgott el a magjából, nagyon közel áll az eredeti, ősi összetételéhez. Az üstökösök a Naprendszer legöregebb égitestei, anyagukban őrzik azt az ősi szoláris ködöt, amelyből valamikor a Naprendszer kialakult. Magjuk jégből, porból és más szilárd anyagokból áll, a jég nagyrészt vízjég, de találhatóak benne jéggé fagyott gázok, pl. ammónia, metán, cián, szén-monoxid. Most első ízben nyílt lehetőség a szilárd anyagok közvetlen vizsgálatára.

A Stardust fedélzetén aerogél csapda fogta be a porszemcséket, az aerogél porózus, sziva-

csos szerkezetű anyag, térfogatának 98,9 %-a ürestér, szilíciumalapú, alumíniumot és szenet is tartalmazó anyag. Az aerogél csaknem teljesen átlátszó (kék füstnek, szilárd füstnek is nevezik), a laboratóriumban a nyomcsíkok alapján keresik meg a foglyul ejtett részecskéket. A pomintákat tartalmazó aerogélről 1,5 millió nagyfelbontású felvételt készít a NASA. A felvételeket az Interneten közléteszik, az elemzés felgyorsítására önkénteseknek is lehetővé teszik, hogy számítógépükkel bekapcsolódjanak a felvételek elemzésébe.

A porszemcsék között forsterit, piroxenit, anortozit, spinell, titán-nitrid ásvány kristályszerkezetű részecskéket mutattak ki. A forsterit szilikát-ásvány, a Vezúv vulkáni bombáiban fedezték fel, a piroxenit magmás kőzet, neve a görög „tűzi eredetű + idegen” szavakból származik, az anortozit mélységi magmás kőzet, a spinell (magnézium-aluminát) is megtalálható a Vezúv bombáiban. Az ásványok rövid jellemzéséből is feltűnik közös vonásuk: létrejöttükhöz magas vagy rendkívül magas hőmérséklet, legalább 1400 kelvin szükséges. Az eddigi álláspont szerint az üstökösök a Naprendszer távoli, hideg tartományaiban, valahol a Neptunuszon túl alakultak ki a kondenzálódott párából. A csak magas hőmérsékleten kialakuló, kristályos szerkezetű anyag viszont csak a csillaghoz sokkal közelebb formálódhatott.

A forró-hideg ellentmondás feloldására két magyarázat született. Az üstökösben talált kristályok a még formálódóban lévő Naprendszer legbelső tartományaiban alakultak ki, ahol a fiatal, nagyon aktív Nap hatására a szilárd anyagok megolvadtak. A Nap mágneses tere kilökte ezt az anyagot a távoli tartományokba, ott lettek az üstökösök alkotórészei a kikristályosodott ásvány-szemcsék. A másik magyarázat szerint a kristályszemcsék egy másik csillag közelében születtek, és valahogy bekertültek a formálódó Naprendszerbe. Ha a későbbiekben az ásvány-szemcsék izotóppozitívumát is kimérik, akkor eldönthető lesz, hogy a mi

Napunk vagy egy másik csillag közelében alakult ki a Wild-2 üstökös anyagának most vizsgált része.

Kerr, Richard A.: Minerals Point to a Hot Origin for Icy Comets. *Science*. 17 March 2006. **311**, 1536

Peplow, Mark: Comet Chasers Get Mineral Shock. *Nature*. 16 March 2006. **440**, 260

J. L.

### KETTESBEN NEM, HÁRMASBAN IGEN!

Vitalij Efimov orosz fizikus 1971-ben különös kvantummechanikai hatást írt le elméletileg, az első kísérleti igazolásra most került sor. Efimov szerint stabil rendszer alakulhat ki három olyan részecskéből, amelyek kettesével egyik párosításban sem alkotnak stabil rendszert. A háromrészecskés állapotban végtelen számú kötött energiaszint létezik. Efimov állítását sokszor próbálták megcáfolni, az elemzések végül újabb és újabb elméleti igazoláshoz vezettek. Efimov szerint két olyan részecskének, amelyek nagyon közel állnak ahhoz, hogy kötött rendszert alkothassanak, egy harmadik képes megadni a stabil rendszer kialakulásához szükséges, még hiányzó kisvonzást. A harmadik részecske lehet a kettőtől nagyon távol, vonzó hatása nagyon gyenge lehet. Tobias Kraemer és munkatársai nem a három részecske-rendszer kötött állapotait mérték meg közvetlenül, hanem három ultrahideg céziumatom re-kombinációját vizsgálták. Ennek során két, az Efimov-állapotokból levezethető következményt figyeltek meg.

Esry, Brett D. – Greene, Chris H.: *A Ménage à Trois Laid Bare*. *Nature*. 16 March 2006. **440**, 289–290.

Kraemer, Tobias et al.: Evidence for Efimov Quantum States in an Ultracold Gas of Caesium Atoms. *Nature*. 16 March 2006. **440**, 315–318.

J. L.

### PASSZÍV DOHÁNYZÁS ÉS CUKORBETEGSÉG

Amerikai kutatók azt állítják, hogy először találtak ok-okozati összefüggést a passzív dohányzás, és a cukorbetegség között. A vizsgálatban 4500 önkéntes vett részt, akiknek egészségi állapotát és dohányzási szokásait először 1985-ben regisztrálták, majd tizenöt évvel később. Azt találták, hogy ezen időszak alatt a dohányosok 22 százalékánál fejlődött ki ún. glükózintolerancia, amelyet sok szakember a cukorbetegség előszobájának tart, és amelynek lényege, hogy a beteg szervezetében az inzulin nem képes elég hatékonyan hasznosulni.

A sorban azok következtek, akik önmaguk soha nem cigarettáztak, de sok időt töltenek dohányos környezetben. Náluk 17 százalékos gyakorisággal alakult ki ez a cukorbeteg előtti állapot. Azok körében, akik valaha füstöltek, de leszoktak egészségtelesen szenvedélyükről, 14 százalékban, míg a sem aktív, sem passzív dohányzást nem folytatóknál 11,5 százalékban mutatták ki a glükózintoleranciát.

A kutatást vezető Thomas Houston szerint (Veterans Affairs Medical Center, Birmingham, Alabama) ezek az adatok azt jelentik, hogy a dohányfüstben lévő mérgező anyagok felhalmozódnak az inzulint termelő hasnyálmirigyben. Ez a feltételezés még megerősítésre vár. Az viszont biztos, hogy a passzív dohányzásnak a szív- és érrendszeri betegségekkel, a rákkal, valamint az asztmával való kapcsolata bizonyítottan tekinthető.

*British Medical Journal* (DOI: 10.1136/bmj.38779.584028.55)

G. J.

## AZ IMA NEM SEGÍT, SŐT...

Nem segíti a szív műtétek utáni gyógyulást, ha a betegért imádkoznak, sőt kifejezetten veszélyesnek tekinthető. Amerikai kutatók Herbert Benson és Jeffery Dusek vezetésével (Mind/Body Medical Institute at Beth Israel Deaconess Medical Center, Chestnut Hill, Massachusetts) 1802 olyan páciens sorsát követték nyomon, akik koszorúér *bypass* műtéten estek át. A betegeket, akik önkéntesként vettek részt a tudományos programban, három csoportra osztották. Az első tagjaiért többféle keresztény csoport is imádkozott, a másodikéért senki, miközben sem a betegek, sem orvosaik nem tudták, hogy melyik társaságba tartoznak. A harmadik csoportért ugyanazok imádkoztak, akik az első csoport tagjaiért, nekik azonban megmondták, hogy az ő gyógyulásukért sokan fohászkodnak.

Az eredmény a kutatókat is meglepte: a műtét után egy hónappal ez utóbbi csoport tagjainál jelentkezett a legtöbb szövődmény, arányuk elérte az 59 százalékot. Az első két csoportnál azonban csak 51, illetve 52 százalékban fordult elő komplikáció.

Bensonék nem adnak magyarázatot a jelenség okára, Mitchell Krukoff (Duke University School of Medicine) azonban igen: szerinte a harmadik csoport páciensei számára plusz stresszt jelentett az a tény, hogy őrítették imádkoztak.

New Scientist Online. 2006. 04. 07.

Benson, Herbert – Dusek, J. A. – Sherwood J. B. Et al.: Study of the Therapeutic Effects of Intercessory Prayer (STEP) in Cardiac Bypass Patients. *American Heart Journal*. 151, 934.

G. J.

## EGYSZER A DISZNÓHÚS IS EGÉSZSÉGES LESZ?

Amerikai kutatók Yifan Dai vezetésével (University of Pittsburgh School of Medicine) olyan genetikailag módosított malacokat kreáltak, amelyek szervezete nagy mennyiségben állítja elő az erekre jótékony hatással bíró ún. omega-3 zsírsavat. Ez a telítetlen zsírsav elsősorban bizonyos halakban, például a tonhalban és a lazacban termelődik, és ez az egyik oka annak, hogy az egészségvédők gyakran buzdítanak több hal fogyasztására.

A kutatók egy gén beépítésével azt érték el, hogy a sertések szervezetében a kevésbé értékes, de annál általánosabban jelen lévő omega-6 zsírsav egy része omega-3 zsírsavvá alakul át. Mivel a disznók keringése nagyon hasonlít az emberéhez, a génmanipulált állatokon a kutatók tanulmányozhatják, hogy a vér magasabb omega-3 zsírsav tartalma milyen élettani hatást gyakorol a keringésre, a szívre, az erekre. A tervek szerint a malacoknak mozogniuk is kell majd, így a mozgás és a zsírsav együttes hatását is vizsgálni fogják.

És persze az sem kizárható, hogy egyszer majd a genetikailag módosított disznók húsa a piacra kerül, és fogyasztásáról nemhogy nem beszélnek majd le bennünket a kardiológusok, hanem egyenesen rábeszélnek.

Lai, Liangxue – Kang, J. X. ... Dai, Y.: Generation of Cloned Transgenic Pigs Rich in Omega-3 Fatty Acids. *Nature Biotechnology*. 24, 435–436. (2006)

Published online: 26 March 2006; | doi:10.1038/nbt1198

G. J.

Jéki László – Gimes Júlia



# Könyvszemle

## *Honismeret felsőfokon*

Nehéz műfaj a honismereti szakirodalom; egy település történetéről, föld- és néprajzáról, természeti és társadalmi környezetéről a nem szakembereknek, legtöbbször a helybélieknek írni, meghaladja egyetlen ember ismereteit, képességeit. Leginkább a szépirodalom sajátos eszközzrendszere nyújt lehetőséget a magas szintű honismeretre, Szabó Zoltán mára klasszikussá vált *Szerelmes földrajza* bizonyosság erre. Ám a szépirodalmi stílus, írás- és látásmód csak kevesek adottsága, és így a honismereti szakirodalom ápolása a szakemberekre marad, ezzel pedig egyben meghatároztuk legfőbb buktatóját is, nincs olyan tudós koponya, aki a honismeret, e szerteágazóan sokrétű ismeretközlés minden területén otthon lenne. Így különböző tudomány- és szakterületek többé-kevésbé jó mesteremberei írták és írják hazánkban a honismereti műveket, és ennek nyomai érződnek alkotásaikon is. Holott a honismeret, amely eredetileg német területen született meg – *Heimatkunde* néven, mintegy száz évvel ezelőtt – igen fontos szerepet tölt be a társadalom földrajzi és történelmi műveltségében, és ezért jelentőségének megfelelő minőségű alkotásokat igényelne.

Az igazi honismeret fontossága abban rejlik, hogy az emberek, ennek a lakóhelyéhez, szűkebb földrajzi környezetéhez általában kötődő társadalmi lénynek nem elegendő az általános és középiskolában a világ és a Föld természeti jelenségeiről, nagytérségeiről, valamint az emberiség és saját társadalmi történetéről közvetített ismeretrendszer. Érdeklődése a szűkebb lakóterét magá-

ban foglaló kistájra is kiterjed – figyelmét felkelti annak földrajza, élővilága, mint ahogyan magára vonja saját településének története is. Fontos ismeretek ezek, mert rajtuk keresztül alakul ki a gyermekben lakóhelyéhez, szülőfalujához, szülővárosához való kötődés; ez a nemzethez való tartozás érzéséhez vivő első lépés is. Ebben a rendkívül fontos ismeretrendszerben találhatjuk meg a honismereti oktatás szinte megoldhatatlan nehézségét. Egyetlen társadalom oktatás- és iskolaügye sincsen felkészülve a magasszintű, ideológiáktól mentes honismereti oktatásra. Nincs, mert nem lehet felkészülve. Az oktatás szervezete, a pedagógusképzés technikailag nem lehet abban a helyzetben, hogy minden község és város honismeretéhez szükséges tárgyi ismereteket rögzítse és közvetítse. Példaként említjük: a magyar oktatásügy – ahogyan más országoké sem – nincs abban a helyzetben, hogy minden falunak, városnak külön helytörténelmi, lokális geográfiai, néprajzi tankönyvei legyenek, és olyan pedagógusai, akik – maradva a geográfus és történelem szakos tanári képzésnél – ugyanúgy értenek mondjuk Pécs, mint Nyíregyháza történetéhez, akik ugyanúgy értenek Győr földrajzi viszonyrendszeréhez, mint a Nógrádi-medence kistájának részletes geográfijához. Az ilyen tanári felkészítés nyilván nem lehet cél. Azonban más a véleményünk a honismereti tankönyvekről, amennyiben meggyőződésünk, hogy az Európai Unióba tagozódó magyar társadalomnak egyre nagyobb szükséges lesz lakóhelye ismeretére, ehhez pedig mesteri fokon írott honismereti művek kellenek. Pontosabban kellenének, mert e téren nagy

lemaradásaink vannak: hiányzik az alapos – didaktikailag is képzett – szakírói gárda, alig találni a helytörténeti kutatást tudományos életcéljának tartó történészt, a helytörténetet és honismeretet közoktatásügyünk még mindig mostohagyermekként kezeli, a pedagógustársadalomban idegenkedés él ezekkel szemben. Mindennek pedig az az eredménye, hogy honismereti műveltségét tekintve elmaradt magyar társadalom próbál helyet találni az Európai Unió éppen e téren oly sokszínű világában.

Ám a honismeretet lehet magas, mondhatnánk európai szinten is művelni. Geográfus körökben régóta tudott, hogy Érden, a Balázs Dénes alapította *Magyar Földrajzi Múzeumban* néhány lelkes szakember – elsősorban az intézmény vezetője, *Kubassek János* – munkájaként, a lokálpatrióták és a pedagógusok támogatásával tudományos igényű honismereti kutatások folynak. Csendes, a témából adódóan jóformán csak a helyiek által ismert munkáról van szó, amelynek eredményét immár másodikik, bővített kiadásban, *Kubassek János* szerkesztésében Érd Város Önkormányzata tette közzé. A mintegy félezer oldalnyi feldolgozás mind terjedelmében, mind minőségében, mind pedig megjelenésében eltér a hazánkban megszokottaktól, és már létével bizonyítja: jó, alapos felkészültségű szakembergárdával, a helyi önkormányzat támogatásával lehet igényes honismereti monografikus művet írni. Ebben az esetben erről van szó, még ha a kötet alcíme szerint honismereti olvasókönyvnek készült is. Az *Érdi krónika* című feldolgozás – reményeink szerint – a későbbi évtizedek magyar honismereti szakirodalmának módszertani útmutatója lesz, és az egyéb helyeken oly kritikusan bíráló recenzens most még azt is megkockáztatja, e művel valami új kezdődött honismeretünkben. Hangoztatjuk e véleményünket annak tudatában, hogy fél évtizeddel ezelőtt – a millenniumi ünnepek kapcsán – divat

volt helytörténeti és honismereti műveket írni: volt rá állami pénz, volt hozzá nagy lelkesedés, ám hiányzott a komoly szakértelem, legfőképpen pedig hiányzott a hosszú évek fáradságos munkája. Az eredmény pedig jóformán semmi, néhány kivételtől eltekintve, lelkes, tudáson alapuló szakértelem nélküli lokálpatrióták meddő nekirugaszkodásai.

Ebből a környezetből messze kiemelkedik az érdi vállalkozás, amelynek szerzői között (*Balaton Katalin, Halász Antal, Kerékgyártó Imréné, Klész László, Kovács Sándor, Krizsán László, Kubassek János, Majorné Bániczki Julianna, Miklósi Csabáné, Patkóné Kéringer Mária, Szerényi Gábor, Szerényi Júlia, Tarnay Tiinde, Lendvainé Timár Edit*) zömükben helybéli vagy Érdhez kötődő szakembereket találunk. Legfőképpen ez utóbbi tényre kell hangsúlyoznunk, mert ha az *Érdi krónika* legfőbb jellemzőjét szeretnénk meghatározni, akkor elsősorban a magas szintű szakmaiságot kell említanünk. Nyilván ennek köszönhető a kötetet jellemző kiegyensúlyozottság, ami az utóbbi időben teljesen eltűnt helytörténeti és honismereti szakirodalomunkból. Az utóbbi évtizedekben az ilyen jellegű alkotások szerzői jelentős szakmai hiányosságokkal küszködtek – a *Tragor Ignác, Fitz Jenő, Fodor József, Cholnoky Jenő, Szabó Zoltán* formátumú helytörténetesek, honismereti szakírók eltűnésével –, ezért e szakirodalom alkotásai belső aránytalanságaikkal tűntek ki. Az időigényes levéltári kutatás hiányában sokszor egész korszakok maradtak ki a helytörténeti, honismereti alkotásokból, míg más – gyakorta kevésbé jelentős – időszakok indokolatlanul hangsúlyosak lettek; egyszerűen azért, mert az adott településen ehhez lehetett dokumentumokat találni, vagy éppen még éltek szemtanúk, a legrosszabb esetben pedig, mert éppen erre vonatkozó szövegrészt lehetett kimásolni valamely monográfiából. Az *Érdi krónika* mentes az ilyen torzulásoktól, az egymást követő fejezetek a város teljes természeti kör-

nyezetét, múltját, jelenét bemutatják, különböző súlyponti eltolódások nélkül, az egyes tematikus fejezetek végén alapos irodalomjegyzékkel, az idézett források, szövegrészek lelőhelyének pontos meghatározásával, ami ismét nem jellemzője mai honismereti, helytörténeti szakirodalmunknak.

Nem óhajtunk e jól sikerült mű szerzői között rangsort meghatározni, de néhány tanulmányra fel kell hívnunk a figyelmet. *Kit-bassek János* Érd teljes földrajzi képét nyújtó fejezete egyrészt mintáját adja, miként kell honismereti mű alapjául geográfiai összefoglalót írni, másrészt pedig – ismereteink szerint – a magyar földrajztudomány történetében ez az első próbálkozás Érd és térsége összefoglaló geográfiai leírására. Elsősorban közérthető nyelvezete, jól válogatott illusztrációi miatt – mert ez is szakértelmet igényel – említjük a *Szerényi Júlia*, *Halász Antal* és *Szerényi Gábor* nevéhez köthető, igen terjedelmes, Érd élővilágát ismertető fejezetet, jó történet-szi szakmunkának tartjuk a *Krizsán László* által írott – a város későközépkori történetét feltáró – részeket. A helyi történelem kényes kérdéseit vizsgáló fejezetek – *Timár Edit*: *Érdiek a szovjet hadifogolytáborokban*, *Kerékgyártó Imréné*: *Nemzetiségek Érden: rácok és németek*, *Balaton Katalin*: *Mozai-kok az érdi zsidóság történetéből* – inkább a probléma felvetésével, mintsem részletes feldolgozásával hívják fel az olvasó figyelmét. A kötet külön érdemének tartjuk, hogy *Kovács Sándor* – a helyi Magyar Földrajzi Múzeum munkatársa – szorgalmas háttémunkájának eredményeként több mint tíz oldal terjedelemben hozza Érd válogatott bibliográfiáját –, ez is unikum a mai magyar helytörténeti és honismereti szakirodalomban.

A kötet szerkesztői és nyomdai munkáját is elismerő szavakkal kell illetnünk. A keménytáblás, fűzött kötés, a jó minőségű színes illusztrációk is például szolgálhatnak a hasonló vállalkozásokhoz. Egyszerűen fogalmazva szép a könyv. Megjegyezzük azonban, hogy néhány fekete-fehér illusztráció minősége nem méltó e nagyszabású vállalkozáshoz, hogy a szövegszerkesztésben túl sok lett a kiemelés – mint mondani szoktuk, a kevesebb több lett volna –, és hogy az *Életrajzi kislexikon* című részben (ami egyébként követésre méltó szakmunka) a születési adatokat közlő sorok végéről itt-ott lemaradt a zárójel.

Végezetül pedig szólnunk kell e kötet hasznosságáról, felhasználhatóságáról is. Ez a hivatalosan honismereti olvasókönyvnek készült feldolgozás nyilván mindennapos taneszköz a helybeli általános és középiskolákban, reményeink szerint talán megtalálható a legtöbb érdi otthonban is. Mert ott van a helye minden család könyvespolcán; egyrészt érdekes olvasmányul, másrészt közhasznú helytörténeti, honismereti adattárul, harmadrészt a helyi társadalom, a kisközösségek együvé tartozásának tankönyveként. Mint ahogy ott van a helye egyetemeink és főiskoláink könyvtárainak kézi olvasójában is; bizonyítandó, hogy hazánkban is létezhet honismeret, és nem középiskolás fokon. (*Kit-bassek János*: *Érdi krónika: Érd természeti képe, múltja, sportja és lakói. Honismereti olvasókönyv. Érd: Érd Város Önkormányzata, 2004. 514 p.*)

*Nagy Miklós Mihály*

egyetemi docens,

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem  
Kossuth Lajos Hadtudományi Kar

## *Kiss Elemér: Matematikai kincsek Bolyai János kéziratok hagyatékából*

„Ami erről a könyvről mondanom kellene, az magában a könyvben megtalálható.”, válaszolta Albert Einstein a *New York Times* riportterének, aki Leopold Infelddel írt könyvről kérdezte. Ez a válasz nem csupán szellemes, de fokozottan igaz minden olyan könyvre, amelynek tartalma jelentős újdonságokkal szolgál. Hiszen az igazán új tudományos eredmények, gondolatok nem hasonlíthatók egyszerű utalásokkal az addigiakhoz, megismerésüket maga a mű szolgálja.

Kiss Elemér eredeti vállalkozása, amely a *Bolyai-ládák* tartalmának, a több mint tízezer, kézzel írott levél és kézirat megfejtésére irányult, általa sem várt eredményre vezetett. A „megfejtés” kifejezés pontosan fedi azt az évtizedeken át tartó tevékenységet, amellyel rekonstruálni tudta a több nyelven és a kor matematikai nyelvezetétől és jelöléseitől helyenként jelentősen eltérő, sokszor szinte olvashatatlan kéziratok tartalmát. Ma már tudjuk, hogy a Bolyai-kutatások történetében páratlan vállalkozás egészen új képet tart elénk Bolyai Jánosról.

Kiss Elemér 1999-ben megjelent, fenti című kötete a kéziratok hagyaték szisztematikusan, ám még nem teljes feldolgozása után született, és a Typotex, valamint az Akadémiai Kiadó jóvoltából kerülhetett az olvasók kezébe magyar és angol nyelven. Az azóta eltelt hat év alatt az első kiadás példányai elfogytak, így mindenképpen szükségessé vált a kötet második kiadása, amely bővített kiadásként tartalmazza Kiss Elemér számos új eredményét a kéziratok hagyaték megfejtésében.

A második, bővített kiadás szerkezeti felépítése megegyezik az első kiadáséval, ám minden fejezetben pontosítások, új összefüggések és az azóta megjelent irodalomra vonatkozó kritikai megjegyzések találhatók.

Az első fejezet, amelynek címe *Bolyai János életútja és a Tér tudománya*, röviden áttekinti azt a sok, klasszikusan megírt kötetekben tárgyalt életutat, amely Bolyait az új geometria megalkotásáig vezette. Ugyanakkor ez a fejezet is tartalmaz, még az első kiadáshoz képest is, igazi újdonságot, amikor igen alapos, tényszerűen a levelezésekre (és nem szóbeszédre) támaszkodó bizonyítását találjuk az 1.6. fejezetben a *nem euklideszi geometria* megalkotásával kapcsolatos prioritási kérdéseknek, amely a Bolyai-Gauss-Lobacsevszkij viszonylatban még ma is zajlik. E fejezetben meggyőző érveléssel mutatja meg a szerző, hogy Bolyai János elsőségéhez nem férhet kétség.

A második fejezet a *Bolyai-ládák*, azaz a teljes kéziratok hagyaték pontos, szisztematikusan leírását adja. Különösen egyediek a 2.6.-2.7. alfejezetek, melyek Bolyai János nyelvezetéről és jelölésrendszeréről szólnak, amelyekről csak olyasvalaki tud ilyen precízítással írni, aki hosszú éveket töltött az igen nehezen kiolvasható, szinte rejtélyes szövegek és képletek megfejtésével. Tulajdonképpen ennek a „rejtjelfejtő” tevékenységnek köszönhetőek azok a matematikai kincsek, amelyeket Kiss Elemér több mint száz év szunyadás után e kötetében közkinccsétett. Akötet további része eme újonnan felfedezett kincsekkel ismerteti meg az olvasót.

Már az első kiadásban is rendkívül izgalmas volt a számelméleti vizsgálódásokat tárgyaló 4. fejezet (Mersenne-féle számok, kis Fermat-tétel, Fermat karácsonyi tétele, Fermat-számok, Wilson tétele, valamint a 3×3-as bűvös négyzetek általános tárgyalása), amely most új, igen érdekes alfejezetekkel bővült: a 4.9., amely a *Zene és matematika*, valamint a 4.10., amely a *Bolyai János és a diofantikus egyenletek* címet kapta. Mindkét fejezet rész tulajdonképpen a diofantikus egyenletekkel foglalkozik, mivel a 4.9.-ben a szomszédos zenei hangok arányait vizsgálja ugyancsak ilyen egyenletek segítségével.

Külön érdekessége ezen gondolatoknak, hogy mindezt Bolyai János az 1840-es évek elején jegyezte fel, a *Muzsikatan* című dolgozatával egy időben. Különös jelentőséggel bír a 4.6. alfejezet, amelyben Bolyai János Fermat-számokkal kapcsolatos érdekes tétele található, a Bolyaitól már-már megszokottan elegáns bizonyítással együtt, mely szerint minden Fermat-szám  $6k-1$  alakú. A tétel jelentőségét és egyben Kiss Elemér kutatásainak nemzetközi elismerését jelenti, hogy a *Historia Mathematica* 1999-es számában, e tárgyban publikált eredményeire való hivatkozással, a 2004. évben a Springer Kiadónál megjelent, Michal Krizek – Florian Luca – Lawrence Somer: *17 Lectures on Fermat Numbers* című kötet 31. oldalán ezt a tételt (3.12. tétel) *Bolyai-tételnek* nevezik. Ez az első olyan rangos forrás, ahol Bolyai Jánosra nem a geometria, hanem a számelmélet területén történik hivatkozás, ami fordulópontnak tekinthető a Bolyai János valódi arcának megismerése felé vezető úton.

Az ötödik fejezet, amely *A prímtan* címet viseli, Bolyai János olyan eredményeivel ismert meg, amelyek a Bolyairól írt, eddigi munkák egyikében sem fellelhetők. Ezek az eredmények a képzetes vagy más néven komplex számokkal foglalkoznak, amelyek kutatásába, a kéziratok tanúsága szerint, Bolyai János majdnem akkora energiákat fektetett, mint a paralelákéba. Eme elméletét nevezte Bolyai János *prímtan*-nak, amely tulajdonképpen a komplex egészek oszthatóságának minden alapvető problémájával foglalkozott. Fontos vonala e fejezetnek, hogy részletesen kitér Carl Friedrich Gauss ugyanez időben e tárgyban végzett vizsgálódásaira, és dokumentumokra alapozva mutatja meg, hogy mindezeket az eredményeket Bolyai Farkas kérése ellenére sem tette hozzáférhetővé, így János szellemi teljesítménye e tárgykörben sem kérdőjelezhető meg.

A hatodik fejezet, *Az algebrai egyenletek elmélete*, feltárja Bolyai János vívódásait az

ötöd és magasabbfokú algebrai egyenletek megoldhatóságával kapcsolatban, amelyet így összegez Kiss Elemér a fejezet végén: „...*a geometerként ismert Bolyai János is sokat töprengett e fontos problémán anélkül, hogy tudta volna, hogy azt előtte vagy vele egy időben már mások megoldották. De a világ sem tudott eddig arról, hogy a 19. század derekán a magyar matematikának is volt olyan tudósa, aki –ha megkésve s talán csak a saját maga megnyugtatására – pontot tett a legkiválóbb matematikusokat évszázadokon át izgalomban tartó problémára.*”

Fontosnak tartom erre az idézetre felhívni a figyelmet, mivel valószínűleg nem véletlen, a szerző *töprengett e fontos problémán* általános megfogalmazása, a *fontos algebrai problémán* helyett. Eme gondolat ugyanis Bolyai János munkássága során más problémákkal kapcsolatban is szó szerint megismételhető, és tökéletesen jelzi azt a szerzetesi elszigeteltséget, amely alkotó tevékenységére volt jellemző, és amely azt a szellemi nagyságot mutatja, hogy nem csupán a geometria területén tudott *a semmiből egy új, más világot* teremteni.

Az első kiadáshoz képest teljesen új fejezetként szerepel e kötetben a hetedik, amely a *Bolyai Jánosnak az analízis tárgykörébe tartozó vizsgálódási* címet kapta. Az új fejezet annál is érdekesebb, mivel a fejezet elején megtudjuk, hogy Bolyai Farkas már 1816-ban Gausszhoz írt levelében írta, hogy „... *fiam [...] kedveli a differenciál- és integrálszámítást és rendkívül készséggel és könnyedén számol velük.*” Ezt az érdeklődését később a sorok és az elliptikus integrálok területére koncentráltta, amelynek általános megoldása élete végéig nem sikerült, így általában speciális feladatok megoldásával foglalkozott.

A nyolcadik fejezetben az első kiadáshoz képest változatlan formában közölt Bolyai-levelek különleges jelentősége, hogy a

mai olvasó számára értelmezhető, érthető nyelvezetre „fordítva” olvashatjuk azokat a kulcsfontosságú írásokat, amelyek eredeti forrásként mutatják be Bolyai János valódi matematikai kincseit.

Mindezt igazi mankóként egészíti ki a kilencedik fejezetben a szerző a *Bolyai által használt műszavak és jelölések* magyarázatával. A második kiadás jelentős újdonsága a 36 tétellel kibővített, 166 tétellel álló irodalomjegyzék.

Kiss Elemér kötete és egész munkássága nehezen túlbecsülhető abban a folyamatban, amely a *Bolyai-ládákba* temetett, majd százötven év szunnyadás után igyekszik közkinccsé tenni Bolyai János valódi arcát. Teszi ezt olyan körülmények között, amikor

a magyar tudomány talán legnagyobb elméjét az egész világon a szó valódi értelmében csupán *ál arc* mögött ismerik, hiszen a Bolyai Jánosról könyvekben, bélyegeken, fotókon, sőt az interneten elterjedt kép (ma már biztosan tudjuk) nem őt ábrázolja. Ennek az állapotnak a megszüntetésére született a [www.titoktan.hu](http://www.titoktan.hu) honlapon a *Bolyai János valódi arca* oldal, amelynek egyik fő célkitűzése az olyan művek és kutatások széleskörű elterjesztése, mint Kiss Elemér fent ismertetett kötete. (*Kiss Elemér: Matematikai kincsek Bolyai János kéziratos hagyatékából. 2. bővített kiadás. Budapest: Typotex Kiadó, 2005*)

Dénes Tamás  
matematikus-kriptográfus

## *Monológ helyett dialógus: két kötet szemléje*

Mintha a platóni dialogizálás újabb divatját élnénk meg: Plátón (fiktivitást sem nélkülöző) diskurzusai úgy tűnik – nyilván olykor csak közvetve –, sokakat sarkallnak. Axiomatikus megállapításomat alátámasztandó, két kötetre szándékozom felhívni a figyelmet.

### *I. Agy Hit Számítógép*

A Hámori József – Roska Tamás – Sajgó Szabolcs triász – invitálásnak eleget téve – mintegy összezárva Dobogókőn vágott neki egy kollektív meditációnak. Könyvkiadói kapacitásnak engedelmessé két természettudományi kutató és egy teológus lelt egymásra.

Előbb a világ kezdete és vége dilemma nyert exponálást, majd Roska kiemelte: a szubkultúra a gyilkos fegyvereknél is nagyobb veszély, tudniillik a kultúra társadalmi méretű elzúllásával fenyeget, s e fenyegetés annál inkább markáns, merthogy a szubkultúra ideológiamentes.

Mindhárman hangsúlyozzák a család (például az e körben elhangzó mesék, a családi

beszélgetések), a nevelés (kiváltképp a jó tanár) meghatározó szerepét.

Hámori disztintívál: megkülönbözteti az idejekorán megadatott hitet a később szervülőtől. Elfogadja az élettani-pszichikus szempontból egyaránt releváns *kritikus periódus* életkori szakaszt, amely valamely funkció ideális kialakításának az érája, s úgy gondolja, az az ember szerencséje, hogy ez nálunk jóval hosszabb, mint az állatoknál (örömmel konstatáltam: az óvoda szerepét nem mellőzi ebben a processzusban Hámori). Üdvözlí Noam Chomsky mélystruktúra-magyarázatát, s a lányok és fiúk eltérő fejlődési tempójának ismeretében a koedukáció legalább a 10. életévig történő megszüntetését – az eredményesebb nevelés-oktatás kedvéért – újra életbe léptetendőnek minősíti.

Roska Tamás (mások mellett) Kurt Gödel újszerűségét és originalitását méltatja. Arisztotelész óta a logika legnagyobb eredményének tartja Gödel tételét (ennek szimplifikált formája szerint vannak olyan igaz állítások, amelyeknek igazsága logikai úton *ab ovo* nem bizonyítható). Szóba kerül a két agyi félteke eltérő funkcionális rendeltetése, lehetséges harmóniájuk előnye, s egy

botránykőszámába menő – magyar nyelven is hozzáférhető kötet – pikáns holdudvara (a Sokalék által jegyzett *Intellektuális impozstorok*<sup>1</sup>-ra gondoljunk, amelyet Roska „plauzibilis mesének” titulál).

Örömmel olvastam a ma nálunk dívó oktatási reformok éles, igaz kritikáját. Nagyon lényeges a racionális és a hitbéli tudásszerzés legalább viszonylagos megkülönböztetése. A hitbéli tudásszerzést illetően a meditáció szerepe érdemelkiemelés, amely nyilván nem pusztán keresztény eljárás.

Sajgó Szabolcs elegánsan érvel amellett, hogy felfogásában a hit nem ismeretek szerzésére alkalmas, hanem személyes magatartásunk Istennel kapcsolatban (ez persze a keresztény interpretáció). A hitnek nyilván van vallástól mentes jelentése is, ám a Sajgó említette minden bizonnyal számításba veendő.

A világ kezdetétől és végétől a szépséghez konkludálnak ők hárman. Sajgó szerint Isten szép. Háromi rákérdez: mi az, hogy szép? Roska felel (s ezzel más nyomon ugyan, de visszajutunk Platónhoz, némileg bővítve őt): „Igazság, jóság, szépség, szentség, ezek azok a bizonyos univerzálék. Egymást is képesek helyettesíteni”.

Három saját, ha tetszik, „szakterületükön” kívül is jelentős szellemi befolyással joggal bíró kutató – a maga terénümán kivétel nélkül ezt teszi – őszinte és tiszteletet, meggondolást érdemlő vallomásával találkozhatunk. A legtöbb kérdésben szinte kísértetiesen egyezik felfogásuk, s ahol nem, ott is mindössze hangsúlybeli eltolódást konstatálhatunk. Nyilván nem fogja valamennyi olvasó olykor némi meghökkenés, homlokráncolás nélkül fogadni a kijelentéseket.

A lényeg: olyan kézikönyv áll immár rendelkezésünkre, amely a jelenkori tudományos pallérozás, ön- és világismeret egyik kedvelt műve lehet.

<sup>1</sup> Sokal, Alan – Bricmont, Jean: *Intellektuális impozstorok – Posztmodern értelmiségek visszaélése a tudománnyal*. Budapest, Typotex, 2000.

## II. Miben hisz, aki nem hisz?

Bölcsesség, az egyéniség respektálása, a felnövesztő közösség, az elődök tisztelete, felelősségérzet kortársak és utódok iránt jellemezte az imént jelzett művet. És konszenzus.

Megnyilvánul-e az ott mutatkozó konszenzus C. Maria Martini (érsek, jezsuita hittudós) és Umberto Eco (nyelvfilozófus – regényíró) diskurzusában? Levélváltás (ami nem oly fundáltságú, mint a Rodostóból írogató Mikes Kelemen képzelgett partnerhez „küldött”) eredménye ez a kötet.

A *hit* az iméntiekben *egyike* volt a kulcskérdéseknek Itt *az*.

1995-ben indított Eco azzal, hogy a katolikusok és a világi hívők felfogását konfrontáltassa-zinkretizálja. A megszólító momentum az akkor várt ezredforduló volt – a János jelenéseinek könyvében jósolt – vizionált Apokalipszis *Apokalipszis most*-tá válik-e. E kérdés feltevése Eco szerint ma inkább a nem hívőkre, s kevésbé a keresztényekre jellemző. Van-e remény?

Martini úgy véli: a történelemnek van haladási iránya, azaz nem abszurd; túlmutat a történelmen, nem a számítás, hanem a reménység tárgya. A remény pedig a dolgokat éppúgy jelzi, mint a dolgok nevét.

Mikortól beszélhetünk az individuum életéről? Igazolható-e a terhességmegszakítás? Eco utóbbi csak tragikusan szélsőséges helyzetekben javallaná a nőknek. Ami az ember előtti, állati szinten egzisztáló lét értékelését illeti: szükséges az általmassági és a hasznossági nívók leválasztása – a szűnyogokkal könyörtelenül elbánhatunk, a disznóölés annak ellenére is lehet számunkra barbár processzus, hogy szeretjük a sonkát; a méheket pedig inkább erényekkel bírónak kategorizálhatjuk, ám a darazsakat nem illeti meg ez az elbánás.

Az élet a fogantatás pillanatától kezdődik, s innentől kell a legnagyobb tisztelettel illetnünk, a legnagyobb értéként vigyáznunk – nyilvánítja ki Martini.

Eco egyformán elfogadhatónak véli a különböző egyházak előírásait – kirovasait. Ez egyfajta tolerancia sugárzása. Ugyanakkor szerinte katolikus ne váljon el, ha ez a szándéka, váljon reformátussá; bosszantják a homoszexuálisok, a házasodni óhajtó papok. Nem érti, miért nem lehetnek papok a nők, s ellentmondásosnak állítja azon utalásokat, amelyek szerint nyíratkozzanak-e a papok, vágják-e le szakálluk végét. Látszólag többé-kevésbé parciális dilemmákat érint Eco, az ezekre adott Martini-válaszok azonban a levélváltás egésze szempontjából paradigmaticusak.

Martini a fundamentalista szövegértelmezést zsákutcának látja, s felhívja a figyelmet arra: a Bibliát általános hermeneutikai elvek alapján, a szövegek születési idejét és környezetét is figyelembe véve kell interpretálnunk. Hiszen – ha akár csak a „lehet-e nő pap” kihívásra koncentrálnunk – érzékelnünk szükséges: az egyház még nem ért el az általa átélt és celebrált misztériumok maradéktalan asszimilálásáig, ám bizalommal tekint előre. Martini a türelem etikájára apellál, arra, amely lemond az abszolút és örök erkölcsi igazságokról. Ugyanis sem a stupid módon védett hagyományok rigorózus őrzése, sem az új

lehetőségek gáttalan elfogadása – kitüntetése nem eredményezhet megoldást.

Summáztaként: „Miben hisz, aki nem hisz? Hinnünk kell legalább az életben, a fiatalok életének ígéretében, akiket a mai kultúra gyakran becsap azzal, hogy a szabadság nevében válogatás nélkül mindenbe belehajszolja őket, aminek aztán kudarca, kilátástalanság, halál, fájdalom a vége” – mondja Martini. (165)

Két, egyformán pallérozott gondolkodó nyilatkozott meg. Példát adtak az egymásra való elmélyült és tiszteletteljes figyelemről, a dilemmákkal való elmélyült felkészülést igénylő szembenézéstről. Amitől tartanak és óvnak (szubkultúra, tévémánia, gondolati restség, a divatdiktátumok fenntartás nélküli respektálása) konvenial az előző kötet szerzőiével. Ilyen diskurzusok sodrában talán könnyebben találhatunk otthonra a kanyargó, rejtekező időben. (*Hámori József – Roska Tamás – Sajgó Szabolcs: Agy Hit Számítógép. Budapest, Éghajlat Könyvkiadó, 2004. 268 p. – Carlo Maria Martini – Umberto Eco: Miben hisz, aki nem hisz? Budapest: Európa Könyvkiadó, 2000. 173 p.*)

*Balogh Tibor*

a filozófiai-pszichológiai-tudomány doktora

## *Járjuk körül a tudományt!*

*Serendipity.* Megvallom, eddig nem találkoztam ezzel a szóval, amiben az is közrejátszhatott, hogy Walpole Horácusz úrnak, Orford grófjának a művei sem kerültek el hozzám. Ez a hiányosság minden bizonnyal tátongó lyuk műveltségem szövetében, de most, egy rendkívül érdekes könyv kapcsán utánanézttem. És tényleg, a nagy *Webster*-ben ott áll: „Horace Walpole-nak tulajdonított [kifejezés], a perzsa 'Serendip három hercege' című mese nyomán, amelyben a hercegeket a véletlen segíti hozzá szerencsés felfedezésekhez”. Nem kellett volna persze sokat kutakodnom, mert a könyv alcíme is utal erre (Véletlen felfedezések a tudomány-

ban), no meg a sorozatszerkesztő Braun Tibor és maga a szerző, Royston M. Roberts is elmagyarázza a bevezetésben.

De valóban véletlen-e a nem várt, nem tervezett jelenség felismerése a tudományos felfedezésekben? Vagy egyszerűen arról van szó, hogy a hozzáértő ember, a tehetséges kutató, a szellem nagyja képes észrevenni, a lába elé került göröngy nem értéktelen kő, hanem kincset rejt magában. Már az előszó írója, Sir Derek H. R. Barton (1969-es kémiai Nobel-díjas, Odd Hassellel megosztva) is az utóbbiról győző meg minket, amikor nagyon plasztikusan írja le, hogyan segítette őt is – méghozzá időszakos kudarcok formájában – nagy felfedezéshez a véletlen. De ahhoz, hogy ebből a kudarc sorozatból Nobel-díj és a vegyipar



számára korszakos jelentőségű eredmény szülessen, tudás és felismerőképesség kellett. Ezt támasztja alá az ugyancsak Nobel-díjas Paul Flory is: „A jelentős találmányok nem pusztán a véletlen termékei, még ha ez a téves nézet széles körben elterjedt is, és sajnos a természettudományos berkekben sem mindig igyekeznek eloszlatni. Persze a véletlen is része a mindennapoknak, ez tagadhatatlan, de [...] a mélyreható tudás és a széleskörű látásmód elengedhetetlen alapkövetelménye minden tudós tevékenységnek. Ha a tudat nincs kellőképpen 'feltöltve', akkor hiába is villan meg a zsenialitás [...] szikrája, nem lesz mit lánggra lobbantania”. Lényegében ugyanezt állítja Louis Pasteur is: „A megfigyelés során a szerencse csak a felkészült, éles elmét támogatja”.

Hamminchat érdekes példával igazolja Roberts könyvében ezeket a megállapításokat. Döntő többségük a kémiai tudományokból származik (bár akad köztük csillagászati vagy régészeti felfedezés is), ahogyan azoknak a híres, márkajelzéssel és szabadalmakkal védett termékeknek a listája is a vegyiparból származik, amelyek közül nem eggyel szinte mindenki találkozott már – a novokaintól a *post-it*-en, a teflonon át a váliumig. Az idők homályos távlatából előtűnő legelső példák még kissé meszerűek, de a többiekben mind érződik, hogy a szerző maga is jeles tudósa lehet a kémiának. (Kár, hogy a könyv írójáról semmit sem tudunk meg, egyetlen célzás Braun Tibor előszavában lelhető föl, amikor a szerzőt professzorként említi. Érdemes lenne a sorozat további köteteiben röviden bemutatni a szerzőket is.)

A könyv kivételes érdeme, hogy nemcsak érdekesek a történetek, hanem a szakmától messze álló olvasó számára is érthetők. Nagyon fontos ez a kémia esetében, mert bizony a nem szakmabeli számára nagyon nehezen érthető és befogadható diszciplína, ráadásul legtöbb művelője nem is igen törekszik arra, hogy a laikus is megértse. Igaz, itt

is felbukkan egy-két molekulaszervezet, de ezek egyszerűek, és segítik az élvezetesen megírt sztorik befogadását.

Roberts műve az Akadémiai Kiadó új vállalkozásaként 2005-ben indított sorozat – *A tudomány körül* – első darabja. A második kötet egy Magyarországon már megismert – és írójának szándékát beteljesítvén, némi vihart is kavart – szerző műve. *A Céh* éppoly keserű és végkicsengésében lehangoló könyv, mint Siegfried Bär előző kiadványa, a *Professzorok és alattvalók* (magyarul 2003-ban jelent meg). Míg a *Serendipity* voltaképpen optimista áradású krónika, hiszen a szerencse és a kutató szellem boldog egymásra találásának sikeres példáit tárja elénk, addig *A Céh* által bemutatott történelem és jövő képe egyként szomorú és kilátástalan, mert végső következtetéseiben az egyetemek, az egyetemi rendszer megreformálhatatlanságát, sőt megváltozhatatlanságát próbálja igazolni. A Céh a 11-12. században kialakult formációnak, az egyetemeknek a története, amelyeket merev szabályokkal, a kívülállókat kizáró, többé-kevésbé önkényesnek tűnő, csak a belültre kerültek szűk és szegényes indítékait szolgáló szervezatként ábrázolja a szerző. Aki feltehetőleg álnév mögött küldi üzeneteit, talán nem véletlen a Medve név sem... A történet során felbukkanó lázadó és többnyire elbukó személyiségei (a sorban legelső Pierre Abélardon kívül legtöbbször németföldi tudós) is mintha Bär életét, összeütközéseit és kívülrekedtségét mintáznák (erre találunk is konkrét utalást a 37-38. oldalon, a 10. számú lábjegyzetben).

Mindenesetre *A Céh* – minden keserősége ellenére – humorral átszótt, nagyon érdekes, jelentős tárgyi tudással és személyesen is megtapasztalt ismeretekkel megírt, magát végigolvasásra – és végiggondolásra – kínáló könyv. Végső összefoglalása, a szerző által megfogalmazott üzenete azonban inkább ellenkezésre, mint elfogadásra készítheti az olvasót. Egyes irodalomtörténészek

felfogása szerint Lev Tolsztoj csak azért írta meg a *Háború és béke*-t, hogy legyen, aki elolvassa a végén megfogalmazott gondolatait a hatalomról. Nos, feltehetőleg Bär is az Üzenetek (280-281. oldal) kedvéért köti le csaknem háromszáz oldalon az olvasót. Mint írja: „Ez egy testes könyv, üzenetei ennek ellenére (vagy ezért?) röviden megfogalmazhatók. Három van belőlük. *Az első üzenet:* az egyetem lényege a céhrendszer volt és maradt. [...] *A második üzenet:* az egyetem problémája a céh. [...] A kutatás kezdeményezési tevékenység, és a versenyből él. A céhek viszont versenyellenesek. A céhrendszerrel az egyetemtörténet minden konstansa megmagyarázható, és hogy léteznek ilyen konstansok, az a *harmadik üzenet*”.

Minden bizonnyal jócskán akad a könyv fejtetegei között seregnyi megszívlelésre, továbbgondolkodásra alkalmas megállapítás.

### *Dr. Buda Béla: Pszichoterápia*

Ismét egy alapművet vehet kezébe az olvasó, ha fellapozza Buda Béla impozáns kiállítású új kötetét, melynek címe rövid, de annál konkrétabb: *Pszichoterápia*.

Szerző pszichiáter, pszichoterapeuta, több évtizedes tapasztalattal a fekvő- és járóbeteg-ellátásban, egyéni és csoportterápiában, tanácsadásban, fejlesztésben és szupervízióban. Fő tevékenységi területe a szenvedélybetegségek terápiája, a szexuális zavarok kezelése, s újabban az egészségfejlesztés és a prevenció, a lelki közegészségügy kutatása és módszertani művelése. Mindez közel 60 önállóan írt és szerkesztett kötetben és számos tanulmányban tükröződik, melyek magyarul és idegen nyelven is megjelentek.

Ezen új és – az Akadémiai Kiadó gondozásában megjelent – originális mű nagy terjedelemben, komplex módon foglalkozik a pszichoterápiával, mely a szerző szerint az emberi segítség és fejlesztés alaptudománya, és mindenfajta gyógyítás a pszichiátriai terá-

Különösen érdekesek és aktuálisak ezek napjainkban Magyarországon, egy nem mindenki által üdvözölt, elsődlegesen hatalmi úton keresztülvitt egyetemi reformfolyamat kezdetén.

*A tudomány körül* – így ajánlja magát e fontos és figyelemre méltó sorozat. Bár talán adekvátabb cím lehetne: A tudomány belülről, mert a szerzők nagyon is belső emberek. Meglehet, éppen ezért oly élvezetes és érthető ez a két könyv. Mindenesetre az első két mű és színvonalas, szép fordításuk (*Serendipity*: Balikó Nándor; *A Céh*: Bognár János munkája) kitűnő ajánlója az ezután megjelenőknek. (*Royston M. Roberts: Serendipity. 282 p.; Siegfried Bär: A Céh. 281 p. Sorozatszerkesztő: Braun Tibor. Budapest, Akadémiai Kiadó, 2005*)

*Szentgyörgyi Zsuzsa*  
tudományos újságíró

pia szükségszerű része is. A kötet Buda Béla eddigi, a témához szorosan vagy közvetve kapcsolódó, rendkívül nagyszámú tanulmányának sajátosan strukturált közreadása. Mostani megjelentetésének célja, hogy segítse a pszichoterápia további fejlődését, terjessze társadalmi gyakorlatát és tekintélyét, hisz a pszichoterápia ősi gyógy mód a lelki problémák, magatartászavarok kezelésében. Napjainkban számtalan iskola és irányzat műveli, szerepe van a képességek fejlesztésében és kreatív kibontakoztatásában is. Lényege: kommunikáció és emberi kapcsolatok. A könyv bemutatja a pszichoterápia történeti kialakulását, alkalmazási területeit, módszereit, kiemelve a sajátosságokat, de megvilágítva a közös elemeket, a lényeges szabályszerűségeket és a felhasználás sokféle lehetőségét. A tanulmányok főleg a pszichoterápia szemléleti alapjairól és kereteiről szólnak, különös tekintettel a kommunikációs folyamatokra és a terápiás kapcsolatra. A kötet tartalmánál fogva egyszerűen alkalmas bevezetésre, továbbképzésre,

speciális szakmai kérdések dilemmáinak megismerésére. Szakemberek is használhatják, de a legkülönbözőbb emberi segítségi és befolyásolási területek művelői is találhatnak benne fontos szempontokat, s az átlagembernek is megkönnyítheti a magatartás és az élmények zavarainak és pszichoterápiás kezelési módjainak megértését.

Nem tagadhatjuk, a szerző nevével összekapcsolódott az empátia, a kommunikációkutatás, melyben iskolateremtő munkát végzett.

### *Süilt galamb?*

Engedtessek meg a recenzióírónak, hogy a bemutatott könyv provokatívnak tűnő fő kérdésével vezesse fel mondanivalóját: „ellentétes-e a magyar nemzeti érdekekkel a csak magyar nyelven történő oktatás?” Ez a kérdés ugyanis a határokon belüli és határokon túli magyar oktatási nyelvű egyetemek, főiskolák vonzatában látszólag *contradictio in adiecto*. Mert hát ugyan milyen nyelven oktassanak egy magyar egyetemen? Természetesen magyarul – hangzik a válasz. Csakhogy a kisebbségek esetében ez a válasz rengeteg problémát vet fel az illető államnyelvvél („második nyelvvel”, „környezeti nyelvvel”), a bolognai folyamattal, a konkurenciaképességgel stb. kapcsolatban. A bemutatott kötet – amely az MTA Magyar Tudományosság Külföldön Elnöki Bizottsága által Debrecenben szervezett, *Megmaradás, korszerű felsőoktatás, tannyelv választás* című, 2004. októberi konferenciájának anyagát tartalmazza – ezt a problémakomplexumot járja körül különböző szempontokból. A résztvevőknek a meghívó szerint a következő kérdésekre kellett válaszolniuk: Az egyes szakokon milyen nyelven folyik a képzés? és a vizsgáztatás? miért?; ha vannak hatályos egyetemi szabályok a tannyelv használatával kapcsolatban, mik azok?; mikor s hogyan keletkeztek?; milyen változtatást tart

A kötet – a Buda Bélától megszokott – közvetlen, jól olvasható és feldolgozható stílusban íródott, végén nagyszámú irodalom segíti a további tájékozódást, illetve a témában történő folyamatos elmélyülést. Szívesen ajánlom olvasásra minden szakembernek és a téma iránt érdeklődőnek. (*Buda Béla: Pszichoterápia. Budapest: Akadémiai Kiadó, 2004. 528 p.*)

*Duró Zsuzsa*

doktorandusz, Szegedi Tudományegyetem Neveléstudományi Doktori Iskola

az előadó szükségesnek, s miért? A válaszok és a hozzájuk csatlakozó vitaanyagok az egyes régiók (Románia, Szlovákia, Ukrajna, Szerbia és Montenegró) szerint vannak csoportosítva a kötetben. Ezt a rendezési logikát követve meglehetősen pontos képet kapunk a határon túli magyar felsőoktatás létező vagy nem létező nyelvpolitikájáról.

Ha a kötet megragadna a ténymegállapításnak ezen a szintjén, akkor a recenzió is véget érhetne ezen a ponton. Csakhogy az összeállító és szerkesztő, Kontra Miklós bevezető tanulmánya (*Tannyelv, (felső)oktatás, nyelvpolitika*) „átrendezi” a fenti kérdéseket, és a nyelvstratégiát a (nem létező) nemzetstratégiához kötve az oktatás nyelvének látszólag egyoldalúan gyakorlati szempontját szinte ontológiai szintű modalitássá változtatja. Érdeemes tehát a kötet írásait ebből a szemszögből újraolvasni. Akkor pedig kiderül, hogy egyrészt szembesülünk bizonyos visszatérő/ismétlődő problémakörökkel, másrészt pedig láthatóvá válik, hogy a nyelvészetben belüli metodológiai különbözőségek eltérő megoldásokat javasolnak ugyanazokra a problémákra. Elegáns szerkesztői megoldás, ahogyan Kontra Miklós bevezető tanulmányának viszonylagos elméleti ellenpontjaként olvashatjuk Péntek János kötetvégi összefoglalóját (*Tanulságok – szentencia nélkül*).

Ennek a nyelvészeti módszertani eltérésnek a háttérében a kötetbe foglalt dolgo-

zatokból kiolvasható egy másik, sajátos kettősség is, amely a rokon problémák egymástól elkülönülő magyarázatát nyújtja. Ez a kettősség egy „funkcionális-deduktív” és egy „történeti-induktív” viszonyulást eredményez. Mit takarnak ezek a fogalmak az én olvasatomban? Alapszinten talán abban ragadható meg a kettő közötti különbség, hogy míg az előbbi szemlélet a nyelvet annak instrumentalitásában és kommunikatív funkciójában próbálja megragadni, addig az utóbbi a nyelv kultúrateremtő és kultúramegőrző szerepét hangsúlyozza ki. A funkcionális szemlélet kiemeli a racionális döntés szerepét a nyelvválasztásnál, vagyis azt, hogy az ún. hozzáadó kétnyelvűség minden esetben pozitívum, és spontán módon is megszerveződik. Ehhez felhoz példákat is, amelyekből kitűnik, hogy az egyetemi hallgatók az olyan szakok esetében, ahol az államnyelv ismerete előfeltétele a sikeres előmenetelnek, nagy arányban választják ezt a nyelvet az oktatás nyelveként. Ez a szemlélet nehezményezi azt is, hogy a politikai döntéshozók nagyon ritkán figyelnek oda a nyelvészet ajánlásaira, és inkább ideologikus határozatokat hoznak. Ezzel szemben – vagy talán inkább emellett – a második szemlélet képviselői a figyelmeztetnek, hogy nincsenek és alkalmazhatatlanok is valamiféle univerzális megoldások. Mindegyik régiónak más és más történelmi hagyományai, valamint politikai kultúrája van, vagyis a kétnyelvűség lehetőségét meghatározza mind az adott kultúrák rokonsága vagy idegensége, mind pedig a létező intézményrendszerek státusa. A funkcionális-deduktív, valamint a történelmi-induktív szemlélet eltérései fogalmi szinten is megjelennek, mert míg az előbbi „hozzáadó kétnyelvűségről” beszél, az utóbbi az „anyanyelv-megtartó kétnyelvűséget” preferálja. Ebben az esetben elméleti túlátlánosításokat is elkövet, mert az az állítás, miszerint az államnyelvi tanulmányok esetében a használatnál mindig az államnyelv fog dominálni, nehezen védhető.

A kötet visszatérő témája az a kérdés, amelyet nagyon ritkán teszünk fel: magyar egyetem, mivégre, miképpen? Az egyetemek létrehozásánál ugyanis csaknem kizárólag történelmi, politikai és demográfiai érvek hoztak fel, az egyetemi oktatás céljairól, mikéntjeiről, egyszerűen az *universitas*-problémáról szó nem esik, vagy ha igen, akkor az ún. politikai pragmatizmus azokat lesöpri az asztalról. Ahogyan a kötetben frappánsan megfogalmazódik: a politika „öntudatosan ignorálja a szaktudomány ajánlásait”. Vagyis mindenütt megmutatkozik a nemzetstratégia és a nyelvstratégia hiánya. Ennek következményeként vagy *ad hoc* döntések születnek (a kompatibilitások és hálózatok végig nem gondoltsága vagy figyelembe nem vétele), vagy pedig várjuk, hogy a sült galamb a szánkba repüljön. (A kötet címe ezért nagyon találó, hiszen itt nemcsak arról van szó, hogy a szakmaiság negligálásával rögtönzésekhez folyamodunk, hanem arról is, hogy nem vesszük figyelembe az idő ökonómiáját, és újabb lemaradásokat generálunk.)

A kötet (Péntek János) egyik ajánlása a kétnyelvűséggel kapcsolatban az ún. háromlépcsős modell minimuma, vagyis az, hogy a diákok az anyanyelv mellett elsajátítsák az adott állam nyelvét (a „környezeti nyelvet” vagy más megfogalmazásban a „második nyelvet”), és erre épüljön valamilyen idegen nyelv („világnyelv”). A kérdés az, hogyan valósítható meg ez a minimum. Leggyakrabban problémaként a terminológia kérdései merülnek fel, vagyis az, hogy a hallgatóknál hiányzik a magyar vagy pedig a második nyelvi terminológiai felkészültség (terminológiai szótárak hiánya), ugyanakkor tény az is, hogy a két- vagy háromnyelvű terminológiai tanítás/tudás nem teljes megoldás. Vagyis a szaknyelv megtanulása a szükséges, ami mind magyar, mind második nyelvi vonzatban gyakorlati használatot jelent. Ez azonban – ahogyan ezt a legpregnansabban Várady Tibor fogalmazta meg – nemcsak

plusz-munkát, hanem magatartást, mentális változtatást is jelent: „nem magyartalan és nem tisztességtelen, hogyha megpróbáljuk szakmánkat a többség nyelvén is jól megtanulni”.

Ugyancsak visszatérő és gyakorta felhozott kérdés az, hogy a „második nyelv” („környezeti nyelv”) megtanítása kinek a feladata: a közoktatásé vagy pedig az egyetemé? Itt alighanem némely többnyelvű egyetem gyakorlata lehet példamutató: a második (esetleg harmadik) nyelv ismerete az egyetemi tanulmányok feltétele lesz. Tehát már a közoktatásban hatékonyabbá kell tenni az államnyelv oktatását. Vagyis – ahogyan azt Péntek János is megfogalmazta – az egyetem feladata a nyelvi kompetenciák szintjének emelése kell, hogy legyen.

*Bertók Lóránd* –

*Donna A. Chow (szerk.): Természetes immunitás*

A *NeuroImmune Biology* 5. köteteként megjelent *Természetes immunitás (Natural Immunity)* című monográfiát szakmai-tartalmi aktualitása és kiemelkedő színvonala mellett magyar gyökerei miatt is érdemes kézbe venni, és ezért az ismertetést is ezzel kezdem.

Selye János stresszel kapcsolatos elméletének kialakítását, kutatásainak zömét az 1940-es években Montrealban végezte. Az élőlényeket az érzékszervek, illetve az idegrendszer közvetítésével érő káros hatások és veszjelzések hormonok és más mediátorok azonnali felszabadításával „stresszreakciót” illetve „általános adaptációs szindrómát” idéznek elő. Ez a védekezési reakció több szerv működését megváltoztatja, és amennyiben az inger hosszan tartó, patológiás állapotokat is létrehozhat. A stressz fogalmát és annak gyakorlati jelentőségét hosszú ideig kétkedéssel fogadta a tudós világ, ma már azonban természetesnek és fontos biológiai jelenségnek fogadjuk el, mely az élővilág

A bemutatott kötet hasznos információforrás, de legnagyobb értéke, hogy a különböző tapasztalatok és nézetek konfrontációjával elméleti és gyakorlati problémákat is feltár. Vagyis inspirál. (*Kontra Miklós (szerk.): Sült galamb? Magyar egyetemi tannyelvpolitika. Somorja-Dunaszerdahely: Fórum Kisebbségkutató Intézet – Lilium Aurum Könyvkiadó, 2005, 254 p.*) A kötet megtekinthető, illetve letölthető a somorjai Fórum Intézet honlapjáról, a Publikációk menüpont *Disputationes Samarienses* sorozatcíméről ([www.foruminst.sk](http://www.foruminst.sk)) <http://www.foruminst.sk/index.php?&Mid=1&Lev1=2&Ind1=0,11&P=publ/disputa/6/disputa6,,>

*Mészáros András*

egyetemi tanár, Comenius Egyetem, Pozsony

fejlődésében és az emberek környezethez való alkalmazkodóképességében az egyik legfontosabb hajtóerő. Az eredeti selyei koncepcióból fejlődtek ki azok a tudományterületek, melyek ma az érdeklődés központjában állnak mint a *neuroendokrinológia*, *neuro-pszichoimmunológia*, *neuro-immunbiológia*. A magyar vonatkozások azonban további szálakkal is kötődnek a most bemutatásra kerülő könyvhöz. Az 1960-as évek közepén ugyanis Selye János, aki kiváló magyar kapcsolatokat tartott fenn, Bertók Lórándot meghívta az intézetébe, hogy kutassa és feltárja a stressz és a fertőzések hormonális kapcsolatait. Ezt követően a stresszkutatások, beleértve a neuro-immunbiológia témáit is, egy winniepei egyetemi intézetben koncentráálódtak, melyben a legkiválóbb kanadai kutatók mellett kiemelkedő magyar tudósok dolgoztak, mint például Berczi István. A kanadai kutatásokhoz több amerikai intézet és kutató is kapcsolódott, mint például Szentiványi Andor. Selye és követőinek kezdeményezésére több igen sikeres szimpóziumot rendeztek az USA-ban, melyek anyagának kiadására az amsterdami Elsevier Kiadó vállalkozott a Berczi István és Szentiványi

Andor szerkesztette *NeuroImmun Biology* monográfiásorozat megindításával.

Felmerül a kérdés, mi a kapcsolat a fenti-ekben kiemelt stressz, a neuro-immunbiológiai tudományterületek és a természetes immunitás között? A „természetes immunitás” felismerése a szerzett vagy adoptív immunitás mellett már nagyon régi gyökereken nyugszik. Az 1800-as évek második felében ismerte fel Ilja Mecsnyikov a falósejteket és a fagocitózis jelenségét, majd a múlt század hozta meg azokat a kutatási eredményeket, melyek a természetes immunitás egyre több elemét írták le, mint például a komplement kaskádját, a gyulladási jelenségeket, a természetes ölüsejteket stb. Az adoptív vagy szerzett immunitással szembeni érdeklődés és az azzal kapcsolatos kutatások előtérbe kerültek, és háttérbe szorították a természetes immunitás tematikáját. Ma viszont megfordult a tendencia, és a természetes immunitás központi szerephez jutott mind a biológiai, mind az orvostudományi szemléletben és a kutatásokban, az e témával foglalkozó közlemények, tudományos ülések megsokszorozódtak. Ez egyrészt a molekuláris genetika előretörésének, másrészt egyes népbetegségek felismerésének tulajdonítható, mint például a daganatos, az autoimmun, a gyulladási és az allergiás betegségek. A természetes immunitás szempontjából a „holt időszakban” a neuro-immunbiológiai és stresszkutatások jelentősége azért tekinthető kiemelkedőnek és úttörőnek, mert a hormonális-, neurotransmitter-közvetített és közvetlen idegrendszeri hatások elsősorban az ún. aspecifikus immunfunkciókra fejtették ki hatásukat, és nem a szerzett vagy specifikus immunreakciókra. Ez a kapcsolat ma vált elfogadottá, és a gyakorlat szempontjából is fontossá, különösen a megelőzés kialakítása, az általános ellenálló képesség, illetve életminőség fejlesztése szempontjából. Mindezek ismeretében felértékelődik a

Bertók Lóránd szerkesztésében megjelent monográfia.

Még egy általános kérdést fontos érinteni a könyv tematikájának ismertetése előtt, mely az utóbbi időben virágkorát élő „komparatív immunológia” ismereteire, illetve kutatási eredményeire vonatkozik. Alapvető kérdés, hogy a filogenezis korai szakában élő primitív élőlények milyen ősi védekezéssel rendelkeztek. Mivel ezek közül több faj több százmillió év alatt semmit nem változott, például a tengeri csillag, a szivacsállatok, a csőszájúak stb., ezen élőlények védekezési mechanizmusai korszerű módszerekkel kutathatók. Ismertté vált, hogy a természetes immunitás alapfunkciói ezekben az élőlényekben alakultak ki, és a ma élő fajokban vagy teljesen azonosan, vagy az ősi konzervatív elemekből felépítve fejlettebb molekuláris formában látják el a védekezés funkcióját. Az ősi mechanizmusok alapvető és elsődleges szerepe a fajfejlődésben támasztja alá azt, hogy a természetes immunitás mindmáig rendkívül fontos és nélkülözhetetlen szerepet játszik az adaptív vagy szerzett immunitás mellett. Külön említést kell tenni például a rovarok és férgek védekezési reakcióiról, melyekben a természetes immunitás biokémiai és biofizikai azonnali reakciói az egyedüliek, mint például az oxidoredukciós folyamatok, az akut fázisfehérjék működése, szövetbontó enzimek, a patogénfelismerő toll receptorok működése, a jelátvivő enzimrendszerek stb. Mindezek a fejlett élőlényekben is alapvető szerepet játszanak, így a *Natural Immunity* monográfia következőkben részletezendő tematikája jobban értelmezhető és megérthető.

Rátérve a monográfia szakmai bemutatására, az egyes fejezetek a következő tematikákat ölelik fel. Az I., *Gazdaszervezet védekező mechanizmusai* című fejezet összefoglalja a túlélés érdekében a környezeti káros hatásokkal szembeni metabolizmusokat. Kiváló általános összefoglalást

kap az olvasó a szerkesztőktől (Berczi I., Bertók L. és D. Chow) a neuroendokrin, az immun- és metabolikus mechanizmusok szerepéről a természetes immunitásban. Ebben a koncepciózus összefoglalásban a történeti áttekintésen kívül megvilágítják a filogenezis során kialakított primitív saját- és idegenfelismerés mechanizmusát, a belső elválasztású mirigyek szekrétumainak védekezésben betöltött szerepét, az elsődleges felismerő receptorok és a természetes ölüsejtek kialakulását és az összefüggéseket a természetes és az adaptív immunitás között, megvilágítva végül a természetes védekezés alapvető szerepét nemcsak az egyén, hanem a társadalom létében és a környezethez való alkalmazkodásában.

A II. fejezet több egységből tevődik össze, mely az *Epitheliális-, szekretoros és endogén védekezés* címmel az antimikrobiális peptidok szerepét, a citoprotektív mechanizmusok és a fiziko-kémiai védekezés elemeit és szerepét ismerteti. Ebben a részben ismerkedhetünk meg a komplex bakteriális peptidstruktúrák ősi felismerő receptoraival, és az aktivációs mechanizmusokkal, a hőszokk proteinek és nitric-oxid enzimatikus folyamat szerepével. A fiziko-kémiai hatások patológiai folyamatokban betöltött szerepét igen jól reprezentálja az epefolyadék ez irányú működésének ismertetése.

Talán a monográfia gerincének ítélné a III. fejezet, mely a *Természetes immunitás* alapvető jelenségeit foglalja össze. Az elismert kutató, Ronald Herberman mutatja be a természetes ölüsejtek felismerésének történetét, melyben neki is elsődleges szerepe volt, és a jelenlegi állásfoglalást az általános védekezésben betöltött szerepükről. Három munka ismerteti a patogén struktúrák felismerését biztosító elsődleges *Toll-like* receptorok működését, a természetes immunitás folyamataiban szerepet játszó egyéb aktivációért és stimulációért felelős receptorokat és a természetes ölüsejtek

jelátvitel-mechanizmusait. Teljessé teszi ezt a fejezetet a retikuloendotheliális rendszer működésének bemutatása, és a gerinctelen fajok természetes védekezési mechanizmusainak ismertetése. Ez utóbbi ismertető tárgyalja a filogenezis kezdetén kialakult primitív fajok nem specifikus immunvédekezését, a *Drosophila* és a férgek már differenciálódó sejtselejteit, antigén receptorstruktúráit és citokin kezdetleges molekuláit. A humorális faktorok között szerepel a komplement és neuroendokrin rendszer kezdetleges összetevőinek bemutatása és szerepe a fajok fejlődésének szemszögéből. Ebben a fejezetben az egyes részeket E. Cooper, D. Chow, G. Lázár és E. Husztki, L. Arneson és P. Leibson, valamint T. Flo és A. Aderem írták.

A IV. fejezetet a *Természetes immunitás regulációja* címet viseli, szerzői egyrészt a Torontói Általános Kutatóintézet és az Egyetemi Központi Kórház munkatársai, másrészt Bertók Lóránd és Berczi István. Kiemelkedően jó, korszerű és részletes leírást találunk ebben a fejezetben a fehérvérsejtek „közlekedéséről”, a *homing* jelenségről, a migrációról, az érfalon keresztüli vándorlásról és mindazokról a receptorokról és „kemokinekről”, melyek e funkciókat irányítják. A leukociták vándorlásának jellegzetességeit megismerhetjük a nyirokszervek, a gasztrointesztinális traktus, az idegrendszer területére vonatkozóan és a gyulladási folyamatokban, melyekben a „kemokinek” is szerepet játszanak. Hasonlóképpen kiváló összefoglalás található a neuroendokrin rendszer regulációs szerepéről a neuropeptidok, hormonok, akut fázisfehérjék regulációs hatásairól, melyek mind megvilágítják az ideg- és endokrinrendszer regulációs hatását az alapvető immunológiai funkciókban. Érdeklődésre tarthat számot az endotoxin jelentőségét ismertető rész, mely egy új szemlélet alapján egy sugárzással módosított lipopoliszaharida készítménnyel a természetes immunitás fokozásának lehetőségét mutatja be.

Az utolsó, az V. fejezet a természetes immunitás fiziológiai, patológiai jelentőségével és az élőlény reflexes, valamint szerzett tulajdonságaival, illetve magatartásával kapcsolatos összefüggéseket vázolja. A három rövid értekezés érinti a reprodukciótól kezdve a regenerációs folyamatokat, a homeosztázist, a daganatok és fertőzések elleni védekezést, az autoimmun folyamatokat, a szepikus és traumás sokk jelentőségét a természetes immunitás funkcióinak tükrében.

Emeli a monográfia értékét, hogy a fejezeteket felépítő minden összefoglaló közleményszerkezetű leírás számos, friss irodalmi adatra hivatkozik, melyek között megtalálhatók az adott tematika legalapvetőbb munkái is. A tárgymutató részletes és jól kezelhető. Mindezek alapján nemcsak a kutató immunológusok, biológusok, orvosok, biokémikusok, genetikusok, de az általános természettudományi szemléletet elsajátítani kívánó oktatók, klinikusok számára is me-

gen ajánlható e monográfia. Végül Donna A. Chow előszavából idézek pár sort: „Ez a kötet magába foglalja a molekuláris, sejt-, kísérletes és humán kutatások robbanásszerű fejlődését, mely drámaian kiterelbelyesítette a természetes immunrendszerről és annak funkciójáról alkotott koncepciókat. A természetes immunitást szélesebb értelemben véve mutatják be, koncentrálna a sejt- és humorális mediátorok hihetetlen gazdagságára, azok evolúciós eredetére az ősi időkben, azok neuroendokrin rendszerrel kialakított közvetlen kapcsolatára, és azok megkérdőjelezhetetlen képességére, hogy interaktív, többszintű védelmet nyújtanak a patogén invázióval szemben...” (Lóránd Bertók – Donna A. Chow (szerk.): *Natural Immunity*. István Berczi – Andor Szentiványi (Editors-in-Chief): *Neuroimmune Biology*. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier, 2005, 379 p.)

Petrányi Győző  
immunológus

## *Kefi, az építész*

Az első Jánossy György volt, aztán Molnár Péter, most pedig Gulyás Zoltán: három építész, akik meghatározó szerepet játszottak a 20. század második felének hazai építészetében, és akikről az utókor úgy érezte, hogy haláluk után könyvben kell emléket állítani nekik és műveiknek. Mindháman annak a generációnak a tagjai, akik közül még sokan élnek, de egyre többen mennek el, ahogy Ferkai András a Gulyás Zoltánról szóló könyv bevezetőjében írja, ez az utolsó pillanat az emlékek rögzítésére.

Meghatározó épületeik mindhármuknak a hatvanas években születtek, a hatvanas években, amely ma egyszerre múlt és nagyon is érezhető jelen. Jelen, mert nemcsak az egykori szereplők vannak még a színen, hanem a róluk személyes emlékeket megőrző tanítványok is, és múlt, hiszen azóta eltelt negyven év, a ma frissdiplomás építészek számára

Jánossy, Molnár és Gulyás történeteit mintha a nagyapjuk mesélné. A kor legendává vált, amelytől nemcsak két generáció választ el, hanem egy rendszerváltás is. Talán ez a legnagyobb akadály, amelyet a Gulyás Zoltánról szóló monográfiának le kell küzdenie. A hatvanas évek a Kádár-korszak eleje, előbb a gulyáskommunizmus, utóbb a frizsiderszocializmus időszaka, amire azok, akik megélték, ma hajlamosak némi nosztalgijával visszaemlékezni. A hatvanas évek az építészetben is viszonylagos aranykor volt, a szocreál kötelező historizálása után újra lehetett a modern építészet szellemében alkotni, a gondosan megtervezett részleteket, a hagyományos anyagok használatát még megengedte az építőipar, amely csak a hetvenes évek fordulójára vette át a hatalmat (és rontotta le a minőséget) a nagyiparhoz kötődő mennyiségi szemlélet jegyében. Az évtized tudományos igényű feldolgozását a történészek és a társadalomtudósok már



elkezdtek, az építészettörténészek még adósak vele. Egy-egy építész bemutatni viszont aligha lehet anélkül, hogy elhelyeznénk kora kontextusában. Különösen igaz ez esetünkben, amikor a hazai környezet, az állami tervezővállalatok sajátos világa meghatározó szerepet játszott a művek és a sorsok alakulásában.

Az építészmonográfiák többnyire azonos rend szerint épülnek fel. Az építész munkásságát értékelő-elemző tanulmányt, esetleg tanulmányokat követi a művek képekkel és ábrákkal kísért minél teljesebb bemutatása, de nem hiányozhat a kronologikus műjegyzék sem. A *Gulyás Zoltán építészete* nem ilyen klasszikus életműkötet, a hatvanas-hetvenes évek építészetihez való, egyelőre még erősen szubjektív viszonyunk okán ez nem is várható. Inkább emlékkönyv, egy építész és általa egy kor megidézése. A kor a könyv minden részében jelen van, így a *Kronológia* című fejezetben is, ahol a megépült házak, a csak papíron maradt tervek és a pályázatok az építész életének fontosabb eseményeivel egybefonódva alkotnak egy sort. Ezek a tömör történetbe helyezett épületek annyira beszédesek, hogy felvetik, nem kellene-e általában is átgondolnunk a műjegyzékírás korábbi iratlan szabályait. A kor felelevenítése, a legenda mesélése azonban nem ér véget. Nem véletlen, hogy a kötet egyetlen tanulmányának a szerző, Ferkai András a *Gondolatok Gulyás Zoltánról* címet adta. Az írásból megismerjük Gulyás életútját, pályájának főbb állomásait, jelentős munkáit, miközben – az egykori kollégákkal és tanítványokkal folytatott beszélgetések alapján – képet kapunk munkamódszeréről és a tervezőirodai közegről is. Az írás mégis több mint egyszerű bemutatás, a művek kapcsán a szerző nem kerül meg az elemzést, amelyből kirajzolódik egy kép a Gulyást ért hatásokról, a számára fontos mintákról, az épületekben tükröződő értékekről. A pálya hetvenes évekbeli megtörésére (Gulyás még csak a

negyvenes éveiben járt ekkor!) is kapunk egy lehetséges, és nagyon is az építészet hazai történetéből következő magyarázatot: „Nem tudta feldolgozni a belső igény szintje és a külvilág közötti szakadást.” A bevezető tanulmánnyal párhuzamosan a lap alsó részén egy másik szövegmező fut, benne a pályatárs, Jurcsik Károly beszél Gulyással kapcsolatos emlékeiről. Az interjú szükség-szerűen a személyes emlékekről szól, a becenevén emlegetett Kefivel közös egyetemi évekről, a közös pályázatokról és a szintén közös nagy élményről, az Angliában töltött egy évről.

Jurcsik Károly Gulyás egyik rá jellemző mondatát is felidézi: „Ház...! Ház...! Minek erről annyit beszélni?” A Gulyás Zoltánról szóló könyv háromnegyedét valóban az épületbemutatók teszik ki. A szerkesztő összesen tíz megépült házat és öt pályázati tervet emelt ki, melyeket többnyire korabeli bemutatató írások kísérek, egyben remek adalékok a korhoz. Az épületek szigorú ismertetésére a szerkesztő vállalkozott, akiből azért itt is kibújik az elemző építészettörténész. Bár a bevezető tanulmányban azt írja, hogy a hatvanas-hetvenes évek hazai építészetét nehéz nemzetközi mércével mérni, az egyes épületekről szólva mintha épp az ellenkezőjét bizonyítaná. Gulyás Zoltán nemzetközi mércével mérte magát, úgy csodálta Erik Gunnar Asplund, Alvar Aalto, Louis Kahn vagy épp James Stirling épületeit, hogy azokat nem másolta, hanem megértve integrálta a saját munkáiba, így teremtve egyszerre nemzetközi minőséget és hazai értéket.

A tizenöt ismertetett munkára összesen százhuszonöt oldal jut a könyvből, építész szemmel nézve ez mégis kevés. Hüblner Teodóra gyönyörű könyvet tervezett, a fekete-fehér komolyságát a szinte egyenrangúként kezelt okkersárga oldja, minden egyes könyvlap önálló kompozíció. Ám úgy tűnik, a tipográfia más törvényeknek engedelmessékedik, mint az építészet. Az épületek pontos

olvashatósága helyett inkább impressziókat kapunk a házakról. Olykor egy apró kép áll kontrasztban az üres lapfelülettel, máskor a teljes oldalt kitölti az értelmezhetetlené nagyított rajzrészlet. Vannak ismétlődő alaprajzok, de inkább olyanok, amelyek a sárga alapon alig látszó fehér vonalak miatt értelmezhetetlenek. Aki nem ismeri a házakat, elég nehezen igazodik ki rajtuk, ami azért is kár, hiszen mindez állítólag az utókorak, a fiataloknak szól. Pedig anyag bőven áll rendelkezésre, a könyv megjelenésével egyidőben, a HAP Galériában tartott Gulyás

Zoltán-kiállításon bemutatott képek, fotók és tervek legalábbis erről tanúskodtak.

Mesélik, Gulyás Zoltán erős dohányos volt. A tervezőirodai füst még itt ül és őrzi a legendát. Idővel majd eloszlik, maradnak a művek, éles kontúrral, egész oldalas képeken. Kefit, az építészt talán elfelejtjük, Gulyás Zoltán neve fennmarad. A majdani szigorú elemzéshez ez a könyv elengedhetetlen forrásmunka lesz. (*Gulyás Zoltán építésze. Szerk.: Ferkai András. HAP Hungaro-Austro Plan, 2005*)

*Simon Mariann*  
építészettörténész, BMGE

---

## *Felhívás*

### **A HEMINGWAY ALAPÍTVÁNY 2006. ÉVI DR. SZABÓ GYÖRGY-ÖSZTÖNDÍJ JELÖLÉSÉRE**

A **Hemingway Alapítvány** kuratóriuma felhívja a hazai egészségügyi ellátásban, az orvosi kutatásban részt vevő intézmények és intézetek munkatársainak figyelmét, hogy a Dr. Szabó György-ösztöndíjra felterjesztést lehet tenni. A díjat évente a hazai orvostudomány egy kiemelkedő egyéniségének adományozza az Alapítvány, melynek tagjai: Dr. Mikola István, Dr. Jakab Ferenc, Dr. Rosivall László, Dr. Szabó Dezső, Dr. Fazekas Árpád, Dr. Surján László.

Az írásban benyújtott – rövid szakmai javaslattal és *curriculum vitae*-vel ellátott – jelölések beküldési határideje **2006. május 31.**

Cím: Hemingway Alapítvány Dr. Szabó György-ösztöndíj kuratóriuma 1023 Bp., Bécsi út 13.

A Hemingway Alapítvány Dr. Szabó György-ösztöndíjait a beérkezett jelölések és a kuratórium egyhangú döntése alapján 2006 szeptemberében ünnepélyes keretek között a Magyar Tudományos Akadémián adják át. Az ösztöndíj ez évben 1 300 000 Ft.

---

# CONTENTS

## *Key to Understand Nature*

### *Introduction of the XI. (Physics) Class of the HAS*

Gyula Faigel: Introduction .....	522
Erika Balog – Judit Fidy: From Genomics to Proteomics and Molecular Dynamics .....	526
Péter Domokos: The Atom-Photon Molecule .....	531
Zoltán Fodor: Phase Diagram of the Strong Interaction .....	536
László Gránásy – Tamás Pusztai – György Tegze: Numerical Modeling of Polycrystalline Solidification .....	539
István Groma – János Lendvai – Tamás Ungár: X-Ray Diffraction as the Fingerprint of Microstructure .....	544
Dezső Horváth: Search for Super-symmetric Particles at CERN .....	550
Katalin Kamarás: Optical Spectroscopy of Carbon Nanotubes .....	555
János Kertész – Tamás Vicsek: Complex Networks in the Nature and Society .....	558
Zoltán Kolláth: Consonance of Pulsations: The Diagnostics of Stellar Interiors .....	565
Péter Lévai: Quark Tomography: Study of Femtometer Size Samples in Nuclear Physics .....	569
Péter Maróti – László Gerencsér: Proton Transport in Proteins .....	575
Sándor Ricz: New Phenomena in the Angular Distribution of Photoelectrons .....	579
Péter Surján: Towards Macromolecules: Linearly Scaling Models in Chemistry .....	585
Károly Szegő: Space Research - Space Activity - Space Physics .....	589
Tamás Temesvári – Tamás Tél: Disorder, Complexity and Chaos: Everyday Concepts in Modern Statistical Physics .....	593

### *Bartók Béla Was Born 125 Years Ago*

„Everyday is a Bartók Anniversary for Me” – Gábor Teimer’s Interview with Pianist Zoltán Kocsis, the General Musical Director of the Hungarian Philharmonic Orchestra .....	598
András Wilhelm: The Unknown Bartók .....	603

### *Study*

Norbert Kroó: Briefly on Mathematics .....	610
József Fritz: Péter Lax .....	614

### *Scientists of the Future* .....

### *Obituary*

János Ferenc Szablya ( <i>Helen Szablya</i> ) .....	625
---	-----

### *Outlook (László Jéki – Júlia Gimes)* .....

### *Book Review (Júlia Sipos)* .....

.....	631
-------	-----

---

# Ajánlás a szerzőknek

**1.** A Magyar Tudomány elsősorban a tudományterületek közötti kommunikációt szeretné elősegíteni, ezért elsősorban olyan kéziratokat fogad el közlésre, amelyek a tudomány egészét érintő, vagy az egyes tudományterületek sajátos problémáit érthetően bemutató témákkal foglalkoznak. Közlünk témaösszefoglaló, magas szintű ismeretterjesztő, illetve egy-egy tudományterület újabb eredményeit bemutató tanulmányokat; a társadalmi élet tudományokkal kapcsolatos eseményeiről szóló beszámolókat, tudománypolitikai elemzéseket és szakmai szempontú könyvismertetőket, de lapunk nem szakfolyóirat, ezért a szerzőktől közérthető, egy-egy tudományterület szaknyelvét mellőző cikkeket várunk.

**2.** A kézirat terjedelme szöveges tanulmányok esetében általában nem haladhatja meg a 30.000 leütést (ez a szóközökkel együtt kb. 8 oldalnak felel meg a MT füzetekben), ha a tanulmány ábrákat, táblázatokat is tartalmaz, kérjük, ezek várható felületével csökkentse a szöveg mennyiségét. Beszámoló, recenzió terjedelme ne haladja meg a 7-8000 leütést. A teljes kéziratot .rtf formátumban, mágneslemezen (CD-n) és 2 kinyomtatott példányban kell a szerkesztőségbe beküldeni.

**3.** A közlemények címének angol fordítását és a legfeljebb 10, magyar kulcsszót külön oldalon kérjük. A tanulmány címe után a szerző(ek) nevét, tudományos fokozatát, a munkahely(ek) pontos megnevezését, és ha közölni kívánja(ják), e-mail címét(eit) kell írni. A külön lapon kérjük azt a levelezési és e-mail címet, telefonszámot is, ahol a szerkesztők a szerzőt általában elérhetik.

**4.** Szöveg közbeni kiemelésként *dőlt* (italic), (esetleg *félkövér* – bold) formázás alkalmazható; ritkítás, VERZÁL (kiskapitális, small capitals, kapitälchen) és aláhúzás nem. A jegyzeteket lábjegyzetként kérjük megadni.

**5.** A képek, ábrák érkehetnek papíron, lemezen vagy e-mail útján. Kérjük azonban a szerzőket: tartsák szem előtt, hogy a folyóirat fekete-fehér; formátuma B5 – tehát ne használjanak színeket, és vegyék figyelembe a megjelenő oldalak méreteit. Általában: a képek, ábrák és magyarázataik legyenek egyszerűek és áttekinthetőek. A lemezen vagy e-mailben érkező képeket lehetőleg .tif vagy

.bmp formátumban kérjük; értelemszerűen fekete-fehérben, min. 150 dpi felbontással, és nagyságuk ne haladja meg a végleges (vagy annak szánt) méreteket. A közlemény szövegében tüntessék fel az ábrák kívánatos helyét.

**6.** Az irodalmi hivatkozásokat mindig a közlemény végén, abc-sorrendben adjuk meg, a lábjegyzetekben legfeljebb utalások lehetnek az irodalomjegyzékre. Irodalmi hivatkozások a szövegben: (szerző, megjelenés éve – Feuer et al., 2002). Ha azonos szerző(k)től ugyanazon évben több tanulmányra hivatkoznak, akkor a közleményeket az évszám után írt a, b, c jelekkel kérjük megkülönböztetni mind a szövegben, mind az irodalomjegyzékben. Fordítsa nekünk külbős figyelmet a bibliográfiai adatoknak a szövegben, illetőleg az irodalomjegyzékben való egyeztetésére! Kérjük: csak olyan és annyi hivatkozást írjanak, amilyen és amennyi elősegíti a megértést. Számuk ne haladja meg a 10-15-öt.

**7.** Az irodalomjegyzéket abc-sorrendben kérjük. A tételek formája a következő legyen:

- Folyóiratcikkek esetében:

Feuer, Michael J. – Towne, L. – Shavelson, R. J. et al. (2002): Scientific Culture and Educational Research. The Educational Researcher. 31, 8, 4–14.

- Könyvek esetében:

Rokkan, Stein – Urwin, D. W. – Smith, J. (eds.) (1982): *The Politics of Territorial Identity: Studies in European Regionalism*. Sage, London

- Tanulmánygyűjtemények esetében:

Halász Gábor – Kovács Katalin (2002): Az OECD tevékenysége az oktatás területén. In: Bábosik István – Kárpáthi Andrea (szerk.): *Összehasonlító pedagógia – A nevelés és oktatás nemzetközi perspektívái*. Books in Print, Budapest

**8.** Havi folyóirat lévén a Magyar Tudomány kefelevonatokat nem tud küldeni, de még az elfogadás előtt minden szerzőnek elküldi egyeztetésre közleménye szerkesztett példányát. A tördelési munka során szükséges apró változtatásokat a szerző időpontegyeztetés után a szerkesztőségben ellenőrizheti.

**9.** A cikkeket a lap internetes oldalán, s az időszakos CD-mellékletben is megjelentetjük. Kérjük, jelezzék, ha ehhez nem járulnak hozzá.