

fizikai szemle

2008/6



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat
havonta megjelenő folyóirata.
Támogatók: A Magyar Tudományos
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,
az Oktatási és Kulturális Minisztérium,
a Magyar Biofizikai Társaság,
a Magyar Nukleáris Társaság
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

Bencze Gyula, Czitrovsky Aladár,
Faigel Gyula, Gyulai József,
Horváth Gábor, Horváth Dezső,
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,
Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin,
Simon Péter, Sükösd Csaba,
Szabados László, Szabó Gábor,
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A Föld a népmesék perspektívájából –
űrliftmodell
(© NASA, grafika Pat Rawlings)

TARTALOM

| | |
|--|-----|
| <i>Nagy Károly:</i> A kvantumelmélet kialakulása Plancktól Diracig | 201 |
| <i>Geszti Tamás:</i> Kvantum és klasszikus határán | 209 |
| <i>Sütő András:</i> Bose–Einstein-kondenzáció és kristályosodás: a folytonos szimmetria sérülésének két esete | 214 |
| <i>Palla Gergely, Kertész János:</i> Szociofizika: humán kapcsolatok hálózata nagy skálán | 217 |
| <i>Kun Ferenc:</i> Fragmentációs folyamatok univerzalitási osztályai | 221 |
| <i>Nagy Imre:</i> Tarnóczy Tivadar, 1929–2007 | 225 |

A FIZIKA TANÍTÁSA

| | |
|---|-----|
| Kugler Sándorné 100. születésnapjára (<i>Szabados László</i> , szerk.) | 226 |
| <i>Horváth Gábor:</i> A mesebeli égig érő paszuly: az űrkábelen suhanó űrlift | 229 |
| <i>Simon Péter:</i> Most jön a tizedik | 234 |

KÖNYVESPOLC

| | |
|--|-----|
| | 235 |
|--|-----|

HÍREK – ESEMÉNYEK

| | |
|--|-----|
| | 237 |
|--|-----|

| | |
|--|--|
| <i>K. Nagy:</i> The early history of quantum theory from Planck to Dirac | |
| <i>T. Geszti:</i> Between classical and quantum | |
| <i>A. Sütő:</i> Bose–Einstein condensation and crystallization | |
| <i>G. Palla, J. Kertész:</i> Sociophysics: large scale human relations net | |
| <i>F. Kun:</i> The universality classes of fragmentation processes | |
| <i>I. Nagy:</i> Tivadar Tarnóczy, 1929–2007 | |

TEACHING PHYSICS

| | |
|---|--|
| G. Kovács-Kugler centenary (<i>L. Szabados</i> , ed.) | |
| <i>G. Horváth:</i> The optimization of skyhook cables and tall plant stalks | |
| <i>P. Simon:</i> A little evening physics | |

BOOKS, EVENTS

| | |
|--|--|
| <i>K. Nagy:</i> Die Entwicklung der Quantentheorie von Planck bis Dirac | |
| <i>T. Geszti:</i> Zwischen klassischer und Quantenphysik | |
| <i>A. Sütő:</i> Bose–Einstein-Kondensation und Kristallisation | |
| <i>G. Palla, J. Kertész:</i> Soziophysik: Große Netze menschlicher Beziehungen | |
| <i>F. Kun:</i> Die Universalitätsklassen von Fragmentationsprozessen | |
| <i>I. Nagy:</i> Tivadar Tarnóczy, 1929–2007 | |

PHYSIKUNTERRICHT

| | |
|--|--|
| G. Kovács-Kugler zum hundertsten Geburtstag (<i>L. Szabados</i>) | |
| <i>G. Horváth:</i> Die Optimierung von Trossen im Kosmos und von Stämmen hochgewachsener Pflanzen | |
| <i>P. Simon:</i> Eine kleine Abendphysik | |

BÜCHER, EREIGNISSE

| | |
|--|--|
| <i>K. Надъ:</i> Первые годы истории квантовой теории | |
| <i>T. Гести:</i> Между квантовой и классической областями | |
| <i>A. Шютт:</i> Конденсация Бозе–Эйнштейна и кристаллизация | |
| <i>G. Палла, Я. Кэртес:</i> Социофизика: Крупномасштабные сети человеческих соотношений | |
| <i>Ф. Кун:</i> Классы универсальностей фрагментационных процессов | |
| <i>И. Надъ:</i> Тивадар Тарноци, 1927–2007 | |

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

| | |
|--|--|
| Д. Ковач-Кутлер – столетие со дня рождения (<i>Л. Сабадош</i>) | |
| <i>G. Хорват:</i> Оптимальные всерхдлинные вертикальные кабели и стволы растений | |
| <i>П. Шилон:</i> Маленькая вечерняя физика | |

КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: mail.elft@mtesz.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVIII. évfolyam

6. szám

2008. június

A KVANTUMELMÉLET KIALAKULÁSA PLANCKTÓL DIRACIG

Nagy Károly

ELTE, Elméleti Fizika Tanszék

*Max Planck*ra emlékező előadásomban a fizika huszadik századi fejlődésének azt a csodálatos szakaszát szeretném néhány jellemző példával bemutatni, amely a század első három évtizedére esett. Vagyis, amely a kvantumhipotézistől kezdve a relativisztikus kvantummechanika dinamikai egyenletének felfedezéséig, tehát Plancktól *Dirac*ig tartott. A huszadik század fizikáját ez az első három évtized alapvetően meghatározta. Ekkor született a század két nagyszerű elmélete, a relativitás- és a kvantumelmélet, amelyek az egész század természettudományos fejlődésének tartóoszlopaiként tekinthetők. Az új fizikát kialakító nagyszerű felismerések sora – a huszadik század fizikájának diadalmenete – a Plancktól származó kvantumhipotézissel kezdődött és máig tart. Azon túlmenően, hogy az anyagi világról alkotott tudományos képünket igen nagy mértékben megváltoztatta, a társ-tudományokra kifejtett megtermékenyítő hatásával, valamint a műszaki és orvosi alkalmazásokkal jelentős mértékben hozzájárult az emberek munkájának a megkönnyítéséhez, szórakozásuk megváltozásához, és nem utolsósorban az emberi élet meghosszabbodásához.

Ahhoz, hogy világgépformáló hatásáról, és a korábbi fizika fogalomrendszerének radikális megváltoztatásáról képet alkothassunk, röviden fel kell idéznünk a fizika 19. század végi állapotát. A newtoni klasszikus mechanika kétszáz éves egyeduralma mellé már felsorakozott a Maxwell-féle elektrodinamika,

amely a korábban különálló elektromosságtant, mágnességtant és optikát egységes keretbe foglalva, térelméleti alapon tárgyalja, a tapasztalattal jó egyezésben. Ismert volt az energia megmaradását kifejező energiatétel, a hőtan első két főtétele, és az anyag atomisztikus felépítését – ugyan ekkor még feltevésként – alapul vevő kinetikus gázelmélet. A newtoni klasszikus mechanikának és a Maxwell-elméletnek lenyűgöző hatása volt a kortársakra. Ugyanis a fizikai rendszerek állapotának mérhető mennyiségekkel történő jellemzése, valamint ezek tér- és időbeli változását meghatározó mozgástörvények lehetővé tették a rendszer fizikai állapotának elméleti meghatározását bármely későbbi időben, ha a kezdeti állapotot ismerjük. Az így kiszámított állapot fizikai jellemzői mérésel ellenőrizhetővé váltak, és ezzel az elmélet jóslatai igazolást nyertek. Ez olyan szellemi teljesítmény, amihez hasonló nem volt ezt megelőzően az emberiség kultúrtörténetében. Ezzel magyarázható, hogy a kor legtekintélyesebb matematikusai is mechanikai problémákkal kezdtek foglalkozni. Így keletkeztek a mechanikai mozgástörvényeknek a newtonival egyenértékű, de attól eltérő, sok esetben általánosabb megfogalmazásai, a *mechanika elvei*.

A mechanikához és az elektrodinamikához hozzávéve a fenomenológiai termodinamikát is, elfogultság nélkül mondhatjuk, hogy ezek olyan csodálatos elméletek, és olyan széles jelenséggört foglalnak magukba, hogy a fizika épülete a befejezettség érzetét keltette a kor fizikusaiiban. Ennek jellemzésére szoktuk idézni a német fizikaprofesszort, *Philipp von Jolly*t, aki a hozzá tanácsért forduló fiatal Plancknak azt mondta, hogy fizikával nem érdemes már foglalkozni, mert ott lényegében minden fontosabb kérdés meg van oldva. Ugyanígy nyilatkozott az angol *Lord*

A Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Max Planck születésének 150. évfordulója alkalmából rendezett emlékülésen 2008. május 14-én elhangzott előadás szerkesztett változata. A *Természet Világa* folyóirat 2005. februári számában azonos címmel megjelent cikkem szövegével – kis változtatástól eltekintve – megegyezik.

Kelvin is, amikor 1900-ban, egy előadásában azt mondta, hogy csak néhány felhőcske zavarja meg a fizika tiszta kék eget. Ilyen beárnyékoló felhőcskének számított a gázok vonalas színképe, a fényelektromos jelenség, a szilárd anyagok fajhőjének függése a hőmérséklettől, és a hőmérsékleti sugárzás intenzitásának spektrális eloszlása.

A kvantumhipotézis.

A sugárzás kvantumos tulajdonságai

A hőmérsékleti sugárzás tanulmányozása során olyan általános sajátságok kiderítését tűzték ki célul, amelyek nem függnek a sugárzást kibocsátó test anyagi minőségétől. Leginkább az izzó testek által kibocsátott sugárzás intenzitásának a rezgésszámtól való függése volt az a probléma, ami a vezető fizikusok egy részét már évek óta foglalkoztatta. Csak a legnagyobbakat említve, *Kirchhoff*, *Wien* és *Rubens* idevonatkozó munkássága jelentős kiinduló pont volt a problémakör megoldatlan kérdéseinek megmagyarázásához. A sugárzás intenzitásának a rezgésszámtól való függését adott hőmérsékleten ki lehetett számolni az elmélet alapján és kísérleti úton is meg lehetett határozni. A kísérleti vizsgálatok azt mutatták, hogy a hőmérsékleti sugárzás intenzitása a termikus egyensúlyi állapotban független a kibocsátó test anyagi minőségétől, csak a hőmérséklettől és a rezgésszámtól függ. A termikus egyensúlyi állapot alatt azt értjük, hogy a sugárzó test időegység alatt átlagosan annyi energiát sugároz ki, mint amennyit elnyel. A problémát az okozta, hogy az intenzitás elméleti úton meghatározott függése a rezgésszámtól nem egyezett a kísérleti eredményekkel.

Ebbe a kutatásba kapcsolódott be Planck (1. ábra). Ő korábban termodinamikai kérdésekkel foglalkozott, ezért erről az oldalról próbálkozott a kérdés megoldásával. A tükröző falakkal bezárt üregben kialakult egyensúlyi sugárzás entrópiáját határozta meg. A tapasztalattal jól egyező eredményt azzal a feltevésével kapott, hogy a sugárzást kibocsátó testnek gondolt oszcillátor (harmonikus rezgést végző tömegpont) energiáját $h\nu$ kvantumok egész számú többszörösének tekintette. A h betű itt egy hatás dimenziójú univerzális állandót jelent. Planck *hatáskvantumnak* nevezte. Ma a szakirodalom Planck tiszteletére *Planck-állandónak* nevezi.¹ Következésképpen ezek az oszcillátorok a sugárzást $h\nu$ kvantumok formájában bocsátják ki és nyelik el.

A klasszikus fizika fogalomvilágához szokott fizikusok körében ez a feltevés igen merésznek tűnt. Annyira, hogy Planck is hosszú ideig csak munkahipotézisnek tekintette, és úgy gondolta, hogy a valóságos folyamatokban az energia természetesen folytonosan

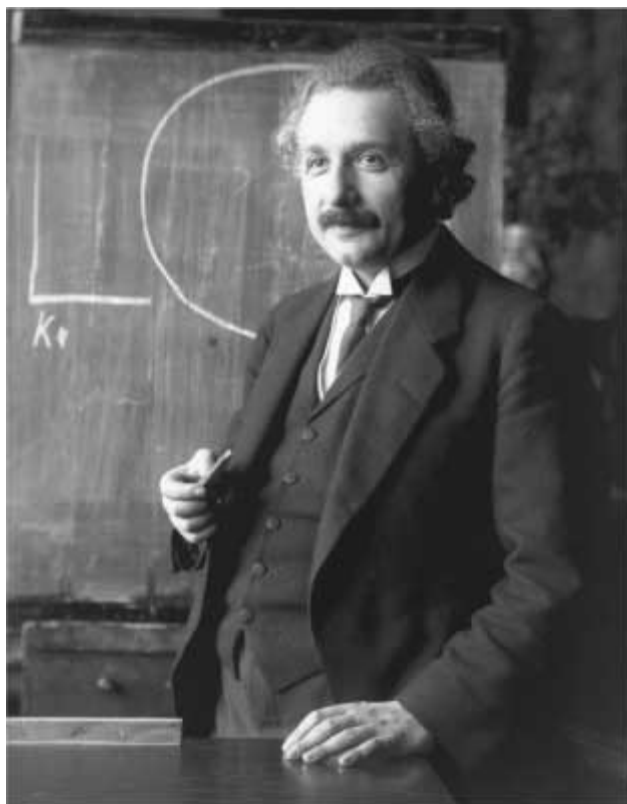


1. ábra. Max Planck 1894-ben

változik, ahogy azt a klasszikus fizika tanítja. A Maxwell-féle elektrodinamika olyan nagy hatással volt rá, hogy nem tudott annak igaz voltától elszakadni. Nagyobb jelentőséget tulajdonított magának a h hatáskvantumnak. Tudományos életrajzában erre így emlékezik vissza. „Amikor a hatáskvantum jelentését entrópia és valószínűség kapcsolatára végérvényesen megállapítottam, még teljesen megmagyarázatlan maradt az a kérdés, hogy milyen szerepet játszik a h állandó a fizikai folyamatok törvényszerű lefolyásánál. Ezért rövidesen próbálkozni kezdtem azzal, hogy a hatáskvantumot valamiképpen beilleszsem a klasszikus elmélet kereteibe, de a hatáskvantum minden ilyen kísérletnek makacsul ellenszegült.... Miután minden kísérlet meghiúsult, nem volt többé kétség az iránt, hogy a hatáskvantum alapvető szerepet játszik az atomfizikában, és fellépésével új korszak kezdődik a fizikában. A hatáskvantumban ugyanis valami eddig soha nem hallott jelentkezik, amely arra van hivatva, hogy alapjában átalakítsa egész fizikai gondolkodásunkat, amely azóta, hogy *Leibnitz* és *Newton* megalapozta az infinitezimális számítást, minden kauzális összefüggés folytonosságának feltételezésén alapult. ... Most tehát pontosan tudtam, hogy a hatáskvantum a fizikában jelentősebb, mint ahogy kezdetben hajlamos voltam feltételezni, és teljesen átérttettem, mennyire szükséges, hogy teljesen új szemléletet és számítási módszert vezessünk be atomisztikus problémák tárgyalásánál.”

A kvantumhipotézis fizikai jelentőségét, vagyis, hogy az energia kvantumos szerkezetű, *Albert Einstein* ismerte fel. Ennek alapján adott elméleti magya-

¹ Kirchhofftól tudjuk, hogy az intenzitás független az anyagi minőségtől, ezért Planck – zsenialitását mutatva – olyan modelltesttel, sugárzást kibocsátó anyaggal – az oszcillátorral – dolgozott, amire a számítás könnyen elvégezhető.



2. ábra. Albert Einstein 1921-ben, Bécsben

rázatot 1905-ben a fényelektromos jelenségre, amelyet a fény hullámelmélete alapján nem lehetett megérteni. A jelenség abban áll, hogy ha fémlémezt – különösen alkáli fémet – ultraviolet fényvel megvilágítunk, elektronok lépnek ki a fém felületéről. A kísérleti tanulmányozás azt mutatja, hogy a kilépő elektronok sebessége nem függ a megvilágító fény intenzitásától, hanem csak a rezgésszámától. A rezgésszám növelésével nő az elektronok sebessége. Másrészt, a fény intenzitásával a kirepülő elektronok száma változik. Nevezetesen, vele arányosan nő. Einstein magyarázata szerint a fém felületén levő atom a ráeső fényből elnyel egy energiakvantumot, ami által egy elektronja akkora energiát vesz fel, hogy kiszakad az atom kötelékéből. A fémre eső fénykvantum $h\nu$ energiája fedezi a kilépéshez szükséges munkát és az elektron $\frac{1}{2}mv^2$ mozgási energiáját. A kilépési munka az az energia, amivel az elektron kötve van az atomban. A jelenségnek a fényenergia kvantumos természetén alapuló magyarázatáért kapta meg Einstein (2. ábra) 1921-ben a fizikai Nobel-díjat.

Einstein az energia kvantumos szerkezetének a feltevésénél még tovább is ment, mert a fény impulzusát is kvantumos természetűnek tekintette, vagyis impulzuskvantumok összegeként fogta fel. Eszerint az elektromágneses sugárzás (tehát a fény is) felfogható úgy, mintha $h\nu$ energiájú, és $h\nu/c$ impulzusú kvázi-részecskék összessége lenne. Ez a kép hasonló ahhoz, amit az ideális gázzal elgondolunk. A kvázi előtag arra utal, hogy ezek a fénykvantumok mégsem tekinthetők a szó eredeti értelmében részecskének, mert mint a kvantumelmélet későbbi alakulása meg-

mutatta, ezekhez a pálya fogalma nem rendelhető hozzá. Az energiával és impulzussal rendelkező fénykvantumot nevezzük *foton*nak. Érdekes felfigyelni rá, hogy a foton impulzusának a fenti kifejezése ugyanolyan alakba írható, mint a közönséges részecskéké; nevezetesen *tömeg* \times *sebesség* alakba. Tömegére a $h\nu/c^2$ adódik. Ez a foton tehetetlen tömege. Nyugalmi tömege, összhangban a relativitás elméletével, zérus.

Ez az iménti gondolatsor ellentétben van az elektromágneses tér Maxwell-féle elméletével, a klasszikus elektrodinamikával. Ez ugyanis a fényt hullámként írja le, és a tapasztalattal jó egyezésben magyarázza meg a fény törését, visszaverődését, elhajlását és interferenciáját. Tulajdonképpen már a hőmérsékleti sugárzás problémájánál a fény kvantumos szerkezetével találkozunk, mert ha a fényforrásként tekintett oszcillátor a sugárzást $h\nu$ adagokban bocsátja ki és nyeli el, akkor ebből természetes módon adódna a következtetés, hogy a fényenergia kvantumos szerkezetű. Planck azonban oly mértékben meg volt győződve a Maxwell-elmélet igazáról, hogy ettől a lépéstől visszariadt. Nem így Einstein, aki mentesen minden előítéllettől bátran kijelentette, hogy a hőmérsékleti sugárzás Planck-féle magyarázatában valójában a sugárzás energiájának kvantumos volta nyilvánul meg. Einstein elgondolását a fényelektromos jelenség magyarázata teljesen igazolta.

A sugárzás részecsketulajdonságának még ennél is meggyőzőbb kísérleti bizonyítéka a *Compton* által 1923-ban elvégzett szórás-kísérlet, amit a szakirodalom egyszerűen Compton-szórás-ként ismer. Itt arról van szó, hogy elektromágneses sugárzás, például röntgensugár szóródik könnyű elemekből álló anyagon, és közben megváltozik a szórt sugárzás rezgésszáma a beesőéhez képest. Ugyanakkor a könnyű elemből elektronok repülnek ki. A jelenség egyszerűen és szemléletesen magyarázható a fény részecskéjellege alapján. A beeső foton (mint részecske) az atom elektronjával ütközik, és közben energiájának egy részét átadja az elektronnak. Nagy rezgésszámú fény esetén az elektron kötési energiája elhanyagolható a foton energiája mellett, és ezért a jelenség úgy fogható fel, mintha a foton szabad elektronon szóródna. Az energia- és impulzustételből kiszámítható a fény rezgésszámának megváltozása, ami jól megegyezik a kísérleti eredményekkel. Az Einstein-féle fotonhipotézis az 1920-as évek végén kidolgozott kvantum-elektrodinamikának már elméleti következménye, amit azóta számtalan kísérleti eredmény bámulatos pontossággal igazolt.

A kvantumhipotézis századik évfordulóján megjelent méltató cikkek és előadások során kapott nyilvánosságot az az írásos dokumentum, amellyel tekintélyes német fizikusok: Max Planck, *Walter Nernst*, Heinrich Rubens és *Emil Warburg* 1913-ban Einsteint a Porosz Tudományos Akadémia tagjának javasolták. Az ajánlásban a munkásságát nagyra értékelő sorok mellett az is szerepelt, hogy „spekulációiban néha szeret túllőni a célon, mint például a fénykvantum

hipotézisében, ezt azonban nem szabad terhére felelni”. Ez mutatja, hogy a kvantumhipotézist még a vezető fizikusok is milyen nehezen fogadták el. A tudományos életrajzából vett fenti Planck-idézet is ezt erősíti meg.

Az elektromágneses sugárzás kvantumozott természete a huszadik század első két évtizedében igen élénk viták tárgya volt. Tulajdonképpen az okozta a problémát, hogy nem tudták összeegyeztetni a fény hullám- és részecskejellegét. Külön érdekesség, hogy a részecskejellegesség megtestesítő foton energiájának és impulzusának kifejezésében a Planck-állandó mellett a hullámok jellemző hullámhossz vagy a rezgésszám is megjelenik. Tehát a részecskejelleg is használja a hullámfelfogást jellemző paramétereket. A sugárzásnak ez a kettős természete volt a fő témája az 1911-ben Brüsszelben rendezett első Solvay-konferenciának (3. ábra). E konferencia sorozatot *Ernest Solvay* belga fiziko-kémikus indította útjára azzal a céllal, hogy a fizika aktuális kérdéseit a fizikusok megbeszélhessék. A fizika huszadik századi történetében ezek a konferenciák fontos szerepet játszottak. Tematikájuk hűen tükrözi a kor fizikájának legizgalmasabb kérdéseit, és a hozzájuk kapcsolódó vitákat, az új fogalmak térhódítását, és a kialakulóban levő kvantumelmélet értelmezésének letisztulását. Meg kell említeni, hogy a kezdeti időszakban ezeknek a vitáknak elsősorban Albert Einstein és *Niels Bohr* voltak a főszereplői, de később már ugyanolyan heves résztvevői voltak az akkor még egészen fiatal *Werner Heisenberg* és *Wolfgang Pauli* is, akik a fizika fogalomrendszerének radikális megváltoztatását kezdeményezték.

Heisenberg határozottan képviselte azt a nézetet, hogy az atomok fizikájának megfogalmazásában csak megfigyelhető mennyiségekhez kapcsolódó fogalmak szerepelhetnek. Például az elektron pályája az atomban nem figyelhető meg, ezért az elméleti leírásból is ki kell hagyni. Ez nem megy könnyen, mert a megszokott, eddig jól bevált régi fogalmaktól nehéz megszabadulni. Ez még inkább igaz, ha az atomfizikai jelenségekhez a makroszkopikus képeket társítjuk.

Visszatérve az elektromágneses sugárzás kvantumozott természetéhez, megemlítem, hogy azzal Einstein később is behatóan foglalkozott. A Planck-törvénnyel kapcsolatban az izgatott, hogy milyen a sugárzás valódi mechanizmusa. Ennek eredményeként a törvénynek olyan levezetését adta meg, amely a sugárzás kibocsátó oszcillátor kvantumállapotai közötti átme-



3. ábra. Az első Solvay-konferencia résztvevői 1911-ben. Ülnek (balról jobbra): W. Nernst, M. Brillouin, E. Solvay (ő nem volt ott a fénykép készítésekor, később ragasztották rá a képre), H. Lorentz, E. Warburg, J. B. Perrin, W. Wien, M. Curie és H. Poincaré. Állnak (balról jobbra): R. Goldschmidt, M. Planck, H. Rubens, A. Sommerfeld, F. Lindemann, M. de Broglie, M. Knudsen, F. Hasenöhr, G. Hostelet, E. Herzen, J. Hopwood Jeans, E. Rutherford, H. Kamerlingh Onnes, A. Einstein és P. Langevin. A képet B. Couprie készítette.

netek valószínűségének fogalmára épül. Az oszcillátor a magasabb energiájú gerjesztett állapotból alacsonyabb energiájúba kétféleképpen mehet. Egyrészt a ráeső sugárzás hatására, másrészt spontán módon magától is. Előbbit indukált, az utóbbit spontán emisszióknak nevezzük. Adott idő alatt a gerjesztett állapotból alacsonyabb energiájúba – elvileg – minden oszcillátor átmehetne, de a valóságban csak egy részük megy át. Ennek értelmezésére Einstein bevezette az átmeneti valószínűség fogalmát, amely megadja azon oszcillátorok hányadát, amelyek időegység alatt az alacsonyabb energiájú állapotba mennek. A spontán emisszió esetén az átmenetben résztvevő oszcillátorok száma a gerjesztett állapotban levők számának és az átmeneti valószínűségnek a szorzatával lesz egyenlő. Az indukált emisszióknál és abszorpcióknál ezt még a sugárzás intenzitásával is szorozni kell. A termikus egyensúly feltétele az, hogy e két fajta emisszióban időegység alatt átlagosan résztvevő oszcillátorok száma egyezzen meg az abszorpcióban résztvevők mennyiségével. Ez a gondolatmenet egyszerűen vezet a Planck-törvényhez, ha feltesszük, hogy az indukált emisszió és az indukált abszorpció átmeneti valószínűségei megegyeznek.

Az átmeneti valószínűség fogalmának a bevetésével Einstein a sugárzás mechanizmusának a leglényegesebb kvantumfizikai törvényszerűségét ismerte fel. A később kidolgozott kvantummechanika és a kvantumtérelmélet ma is ennek a fogalomnak a felhasználásával írja le a kvantumállapotok közötti átmeneteket. A kvantummechanika állapotfüggvényének *Max Born*tól származó statisztikus értelmezése is a valószínűség fogalmán alapszik. A fizikátörténet megoldatlan rejtélye, hogy Einstein, aki elsőként vezette be a valószínűség fogalmát a kvantumelméletbe, an-



monokromatikus oszcillátorokkal helyettesítette, hanem figyelembe vette a kristályrács, mint egész kollektív rezgéseit. Ezáltal különböző sajátrezgéseket kapunk, szemben az eredeti Einstein-féle modellel, amelynél minden oszcillátor ugyanazzal a frekvenciával rezeg. Így a tapasztalattal jól egyező hőmérsékletfüggés adódik. A fajhő T^3 függvény szerint tart a zérushoz, midőn a hőmérséklettel az abszolút zérusponthoz közeledünk.

Atomfizika. Bohr-elmélet

A sugárzásokkal kapcsolatos kvantumos természetű problémák megbeszélése után ráterek a vizsgált kor fizikai fejlődésének másik, máig ható,

4. ábra. Az 1961-es Solvay-konferencia résztvevői. Hátsó sor (balról jobbra): S. Mandelstam, G. Chew, M. L. Goldberger, G. C. Wick, M. Gell-Mann, G. Kallen, E. P. Wigner, G. Wentzel, J. Schwinger, M. Cini és A. S. Wightman, előtűk (balról jobbra): I. Prigogine, A. Pais, A. Salam, W. Heisenberg, F. J. Dyson, R. P. Feynman, L. Rosenfeld, P. A. M. Dirac, L. Van Hove és O. Klein, ülnek (balról jobbra): S. Tomonaga, W. Heitler, Y. Nambu, N. Bohr, F. Perrin, J. R. Oppenheimer, W. L. Bragg, C. Møller, C. J. Gorter, H. Yukawa, R. E. Peierls és H. A. Bethe. Fotó: G. Coopmans.

nak statisztikus értelmezésével élete végéig nem tudott egyet érteni. Fizikus körökben elterjedt a neki tulajdonított mondás, miszerint nem hiszi, hogy az Úristen kockajátékos lett volna, amikor a világot teremtette. Egy Max Bornnak írott levelében olvasható ezzel kapcsolatban a következő: „[a kvantummechanika nagyszerű eredményeinek elismerése után írja] egy belső hang azt súgja nekem, hogy még nem jutottunk elég közel az Öreg titkaihoz. Nem hiszem, hogy kockajátékos lenne.”

Ugyancsak az oszcillátor energiájára vonatkozó Planck-féle kvantumhipotézis alapján sikerült megoldást találni a tizenkilencedik század végének egy másik megoldatlan problémájára, a szilárd anyagok fajhőjének hőmérséklettől való függésére, amely a Boltzmann-statisztika szerint a hőmérséklettől független állandónak adódik. A termodinamika – Nernst által 1906-ban felfedezett – harmadik főtétele szerint viszont zérushoz kell tartania, amint a hőmérsékletet az abszolút zérusponthoz közelítjük. Az ellentmondás feloldásához is Einstein adott útmutatást. A szilárd anyag atomjai szabályos elrendezésben, az egyensúlyi helyzet körül harmonikus rezgéseket végeznek. Az atomokat tehát felfoghatjuk úgy, mintha oszcillátorok lennének. A szilárd anyag energiája tehát oszcillátorenergiák összegeként írható. Az utóbbiak a kvantumhipotézis szerint a $h\nu$ energiakvantumok egész számú többszörösei. Ezt alapul véve kiszámítható a szilárd anyag egy grammjának energiája, amiből a hőmérséklet szerint vett differenciálással adódik a fajhő. A számítás olyan fajhőkifejezésre vezet, amely tartalmazza a hőmérsékletet, és ha a hőmérséklettel a zérusponthoz közeledünk, a fajhő is zérushoz tart. Ezt a gondolatot fejlesztette tovább Debye azzal a finomítással, hogy az atomokat nem

jelentős vonulatára, nevezetesen az anyag szerkezetét érintő fontosabb kérdésekre.

A radioaktivitás és az elektron felfedezésével kísérletileg is igazolttá vált az anyag korpuszkuláris szerkezetének hipotézise, amely a tizenkilencedik században a kinetikus gázelmélet alapját képezte. Minthogy a tapasztalat szerint az anyagból elektronok és alfa-részek jönnek ki, természetes volt a gondolat a tizenkilencedik és huszadik század fordulóján, hogy az atomnak van valamilyen szerkezete. Az elektromosan semleges atomról Rutherford elképzelése az volt, hogy az atom pozitív töltése egyetlen kis központi tartományba sűrűsödik össze, és ezt veszik körül a negatív töltésű elektronok. Ő nevezte el az atom pozitív töltésű kis központi részét az atom magjának. Elgondolását 1909-től kezdve kísérletekkel is megalapozta. A rádium-C sugárforrásból származó alfa-részeket keskeny sugárban valamely anyag vékony lemezére bocsátotta, és vizsgálta azok eltérülését. A céltárgy atomjának magja és az alfa-rész között Coulomb-kölcsönhatást feltételezve, elméleti úton kiszámítható a szórt alfa-részek eloszlása, amit a kísérletekkel ellenőrizhetünk. A kísérletek azt mutatták, hogy 90 foknál nagyobb szögben is térülnek el alfa-részek. Az elméleti képletekkel összehasonlítva azt találta, hogy az alfa-részek 10^{-12} cm távolságra megközelítik az atom magját, és itt még a számításnál feltételezett Coulomb-erő hat. A magon belül más természetű erők is hatnak, de azok ilyen távolságon még nem jelentősek. Rutherford ebből arra következtetett, hogy az atom magja 10^{-12} cm-nél kisebb tartományra koncentrálódik. A legegyszerűbb elképzelés szerint a pozitív töltésű mag körül körpályákon mozognak az elektronok. Ezzel a modellel az a baj, hogy az elektrodinamika törvényei szerint a körpályán mozgó elektronnak

sugározni kell. Ha sugároz, akkor veszít az energiájából, és egyre kisebb sugarú pályára kerülve, végül a teljes energiáját elveszíti, és belezuhan a magba. A Rutherford-modell tehát nem stabil. A mindennapi tapasztalat ennek ellentmond, mert a környező anyagi világ, és benne mi is léteünk, atomjaink tehát nem omlanak össze.

A Rutherford-modell nehézségeinek kiküszöbölésére Niels Bohr 1913-ban a következő feltevésekkel módosította a modellt. 1) Az elektronok körpályákon mozognak a mag körül az atomban, de a klasszikus mechanika szerint lehetséges pályák közül csak olyanokon, amelyeken az elektronnak a magra vonatkoztatott impulzusnyomatéka a Planck-állandó 2π -ed részének egész számú többszöröse. 2) Az így kiválasztott stacionárius pályákon keringő elektronok nem sugároznak. Sugárzás akkor lép fel, amikor az elektron egy magasabb energiájú pályáról alacsonyabb energiájúra ugrik. 3) A két állapot közötti átmenet során kibocsátott sugárzás rezgésszámát a két energia különbsége határozza meg az $E_2 - E_1 = h\nu$ képlet szerint. E három feltételre alapozott kvantumelméletet nevezzük *Bohr-elméletnek*. A hidrogénatomra egyszerű számítással meghatározhatók a stacionárius állapotok energiaértékei, a megfelelő pályák sugarai, valamint a megengedett átmenetek során kibocsátott sugárzás frekvenciái. A hidrogénatom energiájára diszkrét értékek adódnak, amelyek kifejezése a nevezőben tartalmazza az 1. feltételben szereplő egész szám (kvantumszám) négyzetét. A 3. feltétel alapján számított frekvenciák a hidrogénatom vonalas színképeinek elméleti magyarázatát adják. A korábban empirikus úton megállapított Balmer- és egyéb sorozatok egy csapásra magyarázatot nyertek. A színképvonalak káoszában a Bohr-elmélet rendet teremtett. Ez volt az elmélet első szép sikere.

A hidrogénatomra vonatkozó számítás általánosítható olyan nehezebb elemekre, amelyeknél a külső pályán egyetlen elektron kering. A többi, belső pályákon keringve, leárnyékolja a mag vonzó hatását. Ezek a számítások a nehezebb elemeknél is kvalitatív módon adnak számot az energiaszintek diszkrét sorozatáról. A számszerű adatokban mutatkoznak kisebb pontatlanságok, amelyek a leárnyékolás közelítő jellegének rovására írhatók. Az atomok energiájának diszkrét voltát igazolta az 1913-ban *James Franck* és *Gustav Hertz* által elvégzett híres kísérlet. Ritkított gázzal megtöltött üvegcsőben gyorsított elektronokat ütköztettek atomokkal. Az atomokon szóródó elektronok csak akkor tudnak energiát átadni az atomoknak, ha energiájuk megegyezik két energiaszint különbségével. Ilyenkor a rugalmatlanul ütköző elektron elveszíti mozgási energiáját, és emiatt a kísérletben mért anódiáram erőssége lecsökken. Az ütközéssel magasabb energiájú, gerjesztett állapotba került atom nem szívesen van ebben az állapotban, ezért foton kisugárzásával egyidejűleg alapállapotba kerül. A megfigyelt sugárzás frekvenciája megegyezik a Bohr-elméletből az $E_2 - E_1 = h\nu$ képlet alapján számított frekvenciával.

A spektroszkópiai megfigyelések azt mutatják, hogy a színképvonalak több vékony vonalra hasadnak fel. Ezt a színképvonalak finomszerkezetének nevezzük. A Bohr-elmélet eredeti megfogalmazása erről nem ad számot. Az elméletet *Arnold Sommerfeld* általánosította ellipszispályákra, és figyelembe vette a relativisztikus mechanika törvényeit is. A Sommerfeld-féle általánosítás a korábbi egy kvantumszám helyett három egész számot tartalmaz, amelyek mindegyike megjelenik az energia kifejezésében. Az energiaszintek emiatt felhasadnak, és a színképvonalak finomszerkezetét eredményezik.

Az első Bohr-feltétel szerint az elektron impulzusnyomatéka nem vehet fel tetszőleges értékeket, hanem csak azokat, amiket e feltétel megenged. Mivel az impulzusnyomatékhoz mágneses nyomaték társul, következésképpen az atom mágneses nyomatéka is csak diszkrét értékekkel rendelkezhet, az is kvantált. Mivel ezek a mennyiségek vektorok, amelyeknek a nagyságukon kívül irányuk is van, ez azt jelenti, hogy a mágneses nyomaték külső mágneses térhez képest csak meghatározott irányokba állhat be, és nagyága is diszkrét értékeket vehet fel. Az atom mágneses nyomatékának kvantáltságát *Otto Stern* és *Walther Gerlach* 1922-ben kísérlettel igazolták. Ugyancsak a mágneses nyomaték kvantáltságával magyarázható meg a holland fizikusról, *Pieter Zeeman*-ról elnevezett effektus is. Eszerint az atom színképvonalai mágneses térben felhasadnak. Ez az effektus az atom mágneses nyomatékának a mágneses térrel való kölcsönhatásából származó energia kvantáltságának következménye. A Zeeman-effektus tanulmányozása fontos szerepet játszott a kvantumelmélet kialakulásában. A fiatal Heisenberg is ezzel kapcsolatos feladatot kapott tanárától, Sommerfeldtől. Egy Zeeman-effektussal összefüggő színképet kellett megmagyaráznia a Bohr-elmélet alapján. Nagy meglepetésére csak úgy tudta a színképet értelmezni, ha feles kvantumszámokat tételezett fel. Az eredményt Sommerfeld nem fogadta el, mert ekkor még ismeretlen volt az elektron saját impulzusnyomatékának, a spinnek a fogalma, amelynek feles kvantumszáma van. (Pontosabban szólva, a spin értéke a Planck-állandó 2π -ed részének fele.) A spint *Samuel Goudsmit* és *George Uhlenbeck* 1924 végén fedezték fel.

A Bohr-Sommerfeld-féle kvantumelmélet mintegy másfél évtizeden keresztül volt a fizikusok érdeklődésének középpontjában. Sok szép eredménye, és az újszerű gondolkodásra gyakorolt hatása ellenére nem volt tökéletes. Már a héliumot sem lehetett eredményesen tárgyalni vele, Sommerfeld és fiatal tanítványai minden próbálkozása sikertelen maradt. A hidrogénatomra vonatkozóan is csak a színképvonalak frekvenciáit adta meg jól, azok intenzitásait már nem. Mégis azt kell mondanunk, hogy a Bohr-elmélet abból a szempontból sikeres volt, hogy a klasszikus fizika fogalomvilágához képest teljesen új gondolkodást hozott a fizikába. Érdemes felfigyelni arra, hogy minden eredményében megjelenik a h hatáskvantum.

A kvantummechanika

A különféle atomfizikai problémák Bohr-elmélettel való tárgyalása szinte minden esetben azt mutatta, hogy a megoldásban van valami helyes eredmény is, de sohasem adott teljesen pontos leírást és magyarázatot. Ez már jelezte, hogy a klasszikus fizika fogalomrendszerének radikálisabb megváltoztatása kell egy új mechanika megalkotásához. Az új, merész gondolatok elsősorban Bohrnál és a koppenhágai intézetben rövidebb-hosszabb időt eltöltő fiatal fizikusok körében jelentek meg a húszas évek elején. A merészségre jellemző példaként megemlítem, hogy Bohr, *Kramers* és *Slater* a diszperzió tanulmányozása közben még az energiamegmaradás tételéről is hajlandók voltak lemondani az egyes atomi folyamatokban. Elképzelhetőnek tartották, hogy ez a fontos fizikai tétel ezekben az esetekben csak statisztikusan érvényes.

A diszperzió tanulmányozásába kapcsolódott be Heisenberg is, Bohrnál tett első rövidebb tanulmányútja során. Ő volt a legmerészebb a megszokott gondolkodástól való elszakadásban. Azt a filozófiát követte, hogy csak megfigyelhető mennyiségek szerepelhetnek az új elméletben. Az elektron pályája az atomban nem ilyen. Ebből eredően jött az a gondolata, hogy e helyett az elektron helykoordinátáinak és impulzuskomponenseinek Fourier-amplitúdóit kell a számításokban használni. Kitalálta azokat az algebrai szabályokat, amelyeket ezeknek az amplitúdóknak ki kell elégíteniük ahhoz, hogy a megfigyelésekkel egyező eredményt kapjon. Max Born és *Pascal Jordan* mutatták meg, hogy ezek az amplitúdók mátrixok, és a nem-kommutatív algebra szabályai szerint kell őket összeszorozni. Heisenberg a dolgozatot 1925 júliusában közölte. Először Einstein nem hitt benne, Bohr is kételkedett, amíg Pauli e mátrixok segítségével ki nem számolta a hidrogénatom energia-sajátértékeit.

Fél évvel később *Ervin Schrödinger* osztrák elméleti fizikus a *Louis de Broglie* által 1924-ben bevezetett anyaghullám-fogalmat felhasználva, levezetett egy differenciálegyenletet, amelynek reguláris megoldásai az energia-sajátértékeket adják meg. A hidrogénatomra alkalmazva ezek megegyeznek a Bohr-elméletből kapott értékekkel, valamint a Heisenberg mátrixmechanikájából adódókkal is. A Schrödinger-egyenlet azonban nemcsak az energia-sajátértékeket adja meg, hanem az illető sajátállapotot jellemző sajátfüggvényt is, ami egyúttal az impulzusnyomaték és a mágneses nyomaték sajátfüggvénye is, tehát a Bohr-elméletnél gazdagabb információt tartalmaz. Schrödinger azt is megmutatta, hogy az ő differenciálegyenletét használó tárgyalásmód egyenértékű a Heisenberg-féle mátrixmechanikával. Majd később *Paul Dirac* angol fizikus munkásságából kiderül: a két tárgyalásmód abban különbözik egymástól, hogy a fizikai mennyiségekhez rendelt operátorokat egyik esetben mátrixokkal, a másikban a differenciálhányados-képzés műveletével jelenítjük meg. Szakmai kifejezést használva, azt mondjuk, hogy az operátorok reprezentációi mátrixok, illetve differenciáloperátorok. (Operátor alatt

műveletutasítást értünk. Például az operátor szimbóluma után álló függvényt meg kell szorozni egy számmal, vagy venni kell annak a differenciálhányadosát.) A kvantumelmélet e két változatát egyaránt használjuk, és az irodalom közös néven *kvantummechanikának* nevezi. Mivel a fizikában a differenciálszámítás Newton óta matematikai eszköze az elméletnek, ezért az atom- és molekulafizikai alkalmazásokban a Schrödinger-féle tárgyalásmód az elterjedtebb. Az oktatásban is általában ezt használjuk. A kvantumelméletnek fizikai erőterekre, mint például az elektromágneses térre történt alkalmazásaiban a Heisenberg-féle tárgyalás is ugyanúgy használatos.

A kvantummechanikában egy fizikai rendszer, például valamilyen atom vagy molekula fizikai állapotát egy függvénnyel, az *állapotfüggvénnyel* jellemezzük. E függvény változását a Schrödinger-egyenlet írja le ugyanolyan determinisztikus módon, mint például a Maxwell-egyenletek az elektromágneses tér állapotát leírják. Ha a kezdeti állapotot ismerjük – mondjuk valamilyen méréssel meghatároztuk –, akkor az egyenlet megoldásával az állapotot bármely későbbi időpontra kiszámíthatjuk. A kvantummechanikai állapotfüggvénynek azonban nincs olyan közvetlen fizikai jelentése, mint például az elektromos vagy mágneses térerősségeknek az elektromosságban. Ennek ismeretében a fizikai rendszert jellemző mennyiségek valószínűségei határozhatók csak meg, nem pedig tényleges értékük. Az állapotfüggvény valamilyen fizikai mennyiség méréssel meghatározható sajátértékeinek egy-egy állandóval súlyozott szuperpozícióját adja meg. A mérőeszköznek a mérendő tárggyal való kölcsönhatása viszi be az állapotot valamilyik sajátállapotba. Hogy melyikbe, annak csak a valószínűsége adható meg az elmélet alapján. Ezért nevezzük a kvantummechanikát statisztikus elméletnek. Az állapotfüggvény statisztikus értelmezése Max Born-tól származik.

Az elmélet egyik nagyon nevezetes eredménye az ugyancsak Heisenberg-től származó *határozatlansági összefüggések* felfedezése. Eszerint bizonyos fizikai mennyiség-párok, mint például az elektron helye és impulzusa az atomban, nem határozhatók meg egyidejűleg tetszőleges pontossággal. Ha az egyiket nagyon pontosan megmértem, akkor a pár másik tagját már nagyon pontatlanul ismerem csak. Ebből következik, hogy a kvantummechanika szerint az atomban az elektron pályája nem értelmezhető, mert az helyének és sebességének vagy impulzusának egyidejű pontos megadását követeli meg a pályafogalom newtoni meghatározása szerint. Hasonló határozatlansági összefüggés van az atom bármelyik állapotának átlagos élettartama és az ahhoz tartozó energia között is. Ennek következménye, hogy az átmenetek közben kisugárzott színeképvonalak nem tökéletesen élesek. Azt mondjuk, hogy van természetes szélességük.

Már említettem, hogy Einstein nem tudta elfogadni a kvantummechanika statisztikus értelmezését. Ugyanezt mondhatom Schrödingerről és Planckról is. Az igazsághoz hozzátartozik, hogy az elmélet értel-

mezését illetően ma is vannak olyan tudományos közlemények, amelyek vitatják az állapotfüggvény valószínűségi jelentését. Ezek a szerzők úgy vélik, hogy vannak a rendszert jellemző paraméterek, amelyek rejtve maradnak előlünk, ezért kényszerülünk a kvantummechanikában csak valószínűségi jóslatokra. Az értelmezés körüli nézetkülönbségek azonban nem rontják le a kvantummechanika nagyszerű voltát. Az atom- és molekulafizika eredményeivel, valamint a természettudományok más területein érvényesülő alkalmazásaival a kvantummechanika olyan tudományos haladást ért el, amelyre kevés más elmélet volt képes. A sok példa közül itt most csak kettőt említek meg. Az egyik legelső, igen hatásos alkalmazás a kémiai kötés elméleti magyarázata. Ezzel a kémia tulajdonképpen a kvantumfizika egy fejezetévé vált. A másik még ennél is hatásosabb példa a félvezetők tulajdonságainak felismerése, a tranzisztor felfedezése, valamint az ezzel elindult óriási elektronikai fejlődés a mikroelektronikától a számítógépeken keresztül a mobiltelefonig. Ezek a műszaki alkotások nemcsak a munkát tették könnyebbé, de az emberek életkörülményeit, szórakozási szokásait is nagy mértékben megváltoztatták. Lehetne még sorolni a példákat az orvostudomány vagy a biológia területéről is, de azt hiszem ez is elég annak érzékeltetésére, hogy a kvantummechanika milyen nagy hatást fejtett ki a tudományos haladásra.

A Dirac-egyenlet és a pozitron

Mindezek mellett, amit az elmélet nagyszerűségéről, szinte csodálatos voltáról szoltam, azt is meg kell említeni, hogy a fizikusoknak egy igaz elmélettel szemben támasztott igényét teljesen nem elégíti ki. Ugyanis a huszadik század másik igen jelentős fizikai elmélete, a relativitáselmélet, az igaz törvényekkel szemben egy követelményt állít fel. Nevezetesen, azoknak olyan alakúaknak kell lenniük, hogy ne változzanak, amikor egyik vonatkoztatási rendszerről egy másikra térünk át. Pontosabban fogalmazva, az egymáshoz képest egyenes vonalú, egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerek egyenértékűek a fizikai jelenségek leírása szempontjából. Az elméletben ez úgy jelenik meg, hogy az igaz természettörvények változatlanok azzal a transzformációval szemben, amelyik az egyik inerciarendszerről egy másikra történő áttérést írja le. (Ez a Lorentz-transzformáció.) A kvantummechanika alapegyenletei nem ilyenek. Következésképpen finomításra szorulnak. Már Schrödinger is megpróbálkozott ezzel a feladattal, de nem járt sikerrel. A kvantummechanikának a relativitáselmélettel való összhangba hozása Paul Dirac érdeme. 1928 első hónapjaiban publikálta az elektron relativisztikus hullámegyenletét, ami a kvantummechanika relativisztikus általánosítása. Ezt az egyenletet a fizikai szakirodalom megalkotója iránti tiszteletből Dirac-egyenletnek nevezi. Ez az egyenlet, azon túlmenően, hogy teljesíti az említett szimmetriakövetelményt, még az

zsal a nem várt meglepetéssel is szolgált, hogy belőle automatikusan kiadódik az elektron saját impulzusnyomatéka, a spin, és vele együtt a saját mágneses nyomatéka is. A nem-relativisztikus Schrödinger-egyenletben ezek nincsenek benne. Ezeket ott Wolfgang Pauli vette figyelembe, és ennek megfelelően általánosította a Schrödinger-egyenletet. Az atom- és molekulafizikai alkalmazásokban a relativisztikus szimmetria hiánya nem okoz problémát, mert ott az elektronok a vákuumbeli fénysebességhez képest kis sebességgel mozognak, és így a relativisztikus korrekciók nem olyan jelentősek. De a Dirac-egyenletnek a hidrogénatomra vonatkozó megoldása számot ad a színképvonalak finomszerkezetéről, ami a Schrödinger-egyenletből nem következik. A részecskefizikában, ahol általában nagy sebességű részecskék mozgásáról van szó, természetesen a Dirac-egyenletet kell használni.

Dirac nevéhez fűződik még egy nagy jelentőségű felfedezés. Tisztán matematikai megfontolással rájött arra, hogy léteznie kell az elektron egy olyan párjának, amelynek tömege megegyezik az elektronéval, a töltésének a nagysága is, de ellentétes előjelű, vagyis pozitív. Ezt antielektronnak nevezték el. Néhány évvel később (1931-ben) *Anderson* ezt a részecskét kozmikus sugárzásban kísérletileg felfedezte, és pozitronnak nevezte el. Az elméletből az is következik, hogy nemcsak az elektronnak van párja, hanem minden olyan elemi részecskének, amelyiknek a spinje a Planck-állandó 2π -ed részének a fele. Ezeket hívjuk fermionoknak. Későbbi kísérletekben ezeket az antirészecskéket is kimutatták. Sőt, azt mondhatjuk, hogy az utóbbi egy-két évtized részecskefizikai kutatásainak az antirészecék mindennapos résztvevői.

A kvantummechanika elveinek és módszereinek fizikai erőterekre történt kiterjesztése hozta létre a kvantumtérelméletet, amely ma a részecskefizika leghatásosabb fizikai elmélete. Ez természetes folytatása a kvantumhipotézissel és a fény korpuszkuláris elméletével indult huszadik századi fizika egyik fő vonulatának. A másik fizikai elmélet, amely szintén meghatározó szerepet játszott, és ma is azt játszik a huszonegyedik század fizikájában, a relativitáselmélet. Ennek kialakulása is a múlt század első két évtizedére esik.



A huszadik század első három évtizedét tekintetem át, rámutatva azokra a nagyszerű eredményekre, amelyek a Planck-féle kvantumhipotézissel elindult újszerű fizikai gondolkodás hatására születtek. Egy korábbi, hasonló alkalomból megjelent írásomban azt írtam, hogy Planck ajtót nyitott a kvantumok világára. A vele elindult fejlődés valóságos diadalmenete lett a huszadik század fizikájának. Közben sok-sok ajtót kellett megnyitni. Ezekhez a hatáskvantum kulcsként szolgált, hisz' minden alapvető képletben szerepel. Ott van a Bohr-elméletben, a kvantummechanikai axiómákként megjelenő Heisenberg-féle felcserélési törvényekben, és az állapotfüggvény változását meghatározó dinamikai egyenletben, ami a kvantummechanika mozgástörvényének tekintendő.

Előzmények

Első képeink egyikén *Max Planck*ot látjuk szívbeli jóbarátjával és örökös kamarazene-partnerével, *Albert Einstein*nel (1. ábra). Ők történetünk korai évtizedeiben a fizikus közösség élő lelkiismeretének szerepét játszották: mindig jeleztek, valahányszor a formalizmus szépsége messzire ragadta a kvantumelmélet művelőit. Jelzéseik nem mindig voltak közvetlenül igazak, de mindig jó irányba terelték a fogékony kutatók gondolkodását.

Planckról általában ilyen időskori, megállapodott úriembert mutató képeket szokás közölni. 1901-ben azonban, negyvenhárom évesen, amikor nagy felfedezését közölte, még inkább sportrepülőnek látszott, aki kis kétfedelű gépén a rejtélyes kísérleti eredmények hegycsúcsai fölött átsuhanva, elsőként pillantotta meg a kvantumfizika termékeny síkságát (2. ábra). Sokan követték: a fizika benépesítette és belakta a kvantumjelenségek országát.

A kezdetektől fogva felmerült azonban az igény, hogy ne feledjük, honnan jöttünk: tegyük járhatóvá az utat visszafelé, a kvantumfizikából a klasszikus fizikába. Először úgy látszott, hogy a feladat nem túl ne-

héz. Amikor *de Broglie* és *Schrödinger* felderítette a kvantálás mögött rejlő hullámmozgás természetét, kézenfekvő volt, hogy a klasszikusságot a rövid hullámok határesetében fedezzék fel. Ezt először *Niels Bohr* fogalmazta meg úgy, hogy a nagy kvantumszámok határesetére felel meg a klasszikus fizikába való átmenetnek; ezt nevezte ő „a korrespondencia elvének”. Hasonló volt a tartalma annak a matematikailag részletesen kidolgozott sémának, amelyben *Wentzel*, *Kramers* és *Brillouin* (WKB) vezette le a rövid hullámok határesetének matematikáját. Akárhogy is nézzük, annyi tényleg igaz, hogy rövid hullámokból szuperpozícióval összerakhatunk olyan hullámcsomagokat, amelyek a klasszikus mechanika törvényei szerint mozognak.

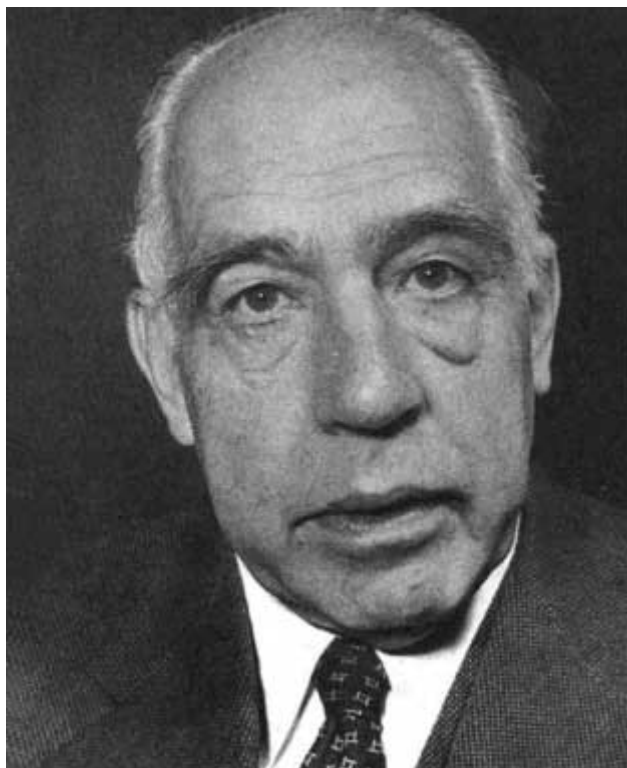
Ez azonban nem old meg semmit: a hullámcsomagban ott van a hullám, amely résekkel vagy nyalábostókkal szétválasztva, majd újra egyesítve interferenciára képes. Addig pedig ez bizony valódi kvantummechanika, hiszen klasszikus mechanikában a mozgó testek nem mennek kétfelé, és nem interferálnak! Azóta számos rendszert ismertünk meg, a félvezető nanostruktúrákban mozgó elektronoktól az atom- és molekula-interferométerekig, amelyekben a folyama-

1. ábra. Planck és Einstein egy fogadáson



2. ábra. Planck 1901-ben





3. ábra. Niels Bohr



4. ábra. John Bell

tok a rövid hullámok határesetében játszódnak le, de a kvantummechanikai interferencia zavartalanul működik. Ezért aztán ezt a határesetet mostanában már csak „félklasszikusnak” nevezik.

A legjobbak számára hamar világossá válhatott, hogy a klasszikusság magyarázata a kvantummechanika oldaláról nézve valójában rettentően nehéz kérdés, amely legalább két problémakört foglal magába: a koherencia elvesztését, és a mérésben megnyilvánuló véletlenszerűség eredetét. Különösen az utóbbi gonosz, mert ellentmondani látszik a Schrödinger-egyenlet linearitásának. Bohr volt az, akiben mindez vészjelzésként fogalmazódott meg: ha a fizikusok ennek a kibogozásába ölik idejüket-energiájukat, akkor számtalan fontos és megoldható feladat halaszódik a beláthatatlan jövőre.

A bohri tanács ez lehetett volna: Tartsátok magatokat távol a kvantum–klasszikus határ bonyodalmaiktól, érezzétek jól magatokat a kvantumozó birodalomban, használjátok bizalommal a valószínűségek kiszámítására szolgáló Born-szabályt, és magyarázatok meg minél többet a világból!

Hallatlanul bölcs tanács, és sikeres is: a hagyományosan kvantumozó tárgyaknak számító atomok és molekulák fizikája mellett megszületett és kivirágzott a kristályos szilárd testek, atommagok, stabil és pillanatnyi életű elemi részek sokaságának kvantumelmélete, amely a lineáris Schrödinger-egyenlet és a kvadratus Born-szabály határolta játéktéren belül tetszőlegesen éles és színekben gazdag képet rajzolt a környező világról. Ezért igazán szerény árat jelentett az, hogy évtizedeken át rossz modornak számított a kvantum–klasszikus átmenet bonyodalmaiktól firtatni.

Sajnos Bohr (3. ábra) zseniális tanácsait egy erősen tekintélytiszteelő tradícióban gyökerező szavakba öntötte:

- A klasszikus és kvantumozó világ egymás mellett létezik; különböznek egymástól, a kvantumvilágban van szuperpozíció, a klasszikusban nincs.
- A két világ csak a mérés folyamatában érintkezik egymással; ilyenkor véletlen választás történik, a Born-szabály megszabta valószínűségek alapján.
- Mi csak a világ klasszikus felét láthatjuk, a kvantumozó világ csak árnyék.

Ez a keményen koppanó parancssorozat a „koppenhágai interpretáció” néven vonult be a fizika történetébe. Akik a fő csapáson dolgoztak, azok számára mindez csak afféle vitrinbe való dokumentum szerepét játszotta. Akiket azonban makacsul a kvantumklasszikus határvidék nehezen járható, de mégis varázslatos hegyei érdekelték, azok számára a frusztráció forrásává vált. Ezt fejezte ki az elterjedt – Feynmannak tulajdonított, valójában ismeretlen eredetű – aranyköpés, amely szerint a koppenhágai interpretáció tartalma röviden: „Shut up and calculate!” – Magyarul: Befogod a szád és számolsz!

A lelki áttörést a hatvanas évek végétől John Stuart Bell hozta meg (4. ábra), aki – miután huszonéves korában megalkotta főművét, a híres Bell-egyenlőtlenségeket – óriási lendülettel kezdte támadni és gúnyolni a koppenhágai szellemű kvantummechanika világát. Tőle származik a hírhedten sértő hangulatú betűszó: a kvantummechanika »FAPP« (For All Practical Purposes, azaz minden gyakorlati célra) kiválóan működik, miközben az értelme homályban marad.

Az alábbiakban röviden áttekintjük a huszadik század utolsó harmadában megszületett elméleti irányzatokat, amelyek célja a rejtélyes kvantum–klasszikus határvidék felderítése. A kutatások tartalmilag és technikailag is világosan két részre oszthatók: a koherencia elvesztését – a dekoherenciát – lényegében a lineáris Schrödinger-egyenlet érvényességi körén belül sikerült megérteni. Ha azonban a mérésben megnyilvánuló véletlen választást és a hullámfüggvény ezzel járó, híres „kollapszusát” valóságos fizikai folyamatként szeretnénk magyarázni, ahhoz óvatosan ki kell lépni a Schrödinger-egyenlet világából.

Környezet okozta dekoherencia

Hogy a makrovilágban látott testek miért nem képesek koherens hullámmozgásra, azt először *Heinz-Dieter Zeh* értette meg és írta le 1970-es dolgozatában. Zeh még egy különleges életrevalósági teszten is átment: egy konferencián több órás diszkusszióban meggyőzte *Wigner Jenőt* elképzelése alapvető helyességéről. Ez sokat lendített azon, hogy a dekoherencia elméletéből a kvantumelmélet tiszteletreméltó fejezete fejlődhessen ki.

Az alapgondolat nagyon egyszerű. Induljunk ki egy anyaghullámból, amelynek amplitúdója két részhullám amplitúdóinak szuperpozíciója (egyszerűség kedvéért egyetlen x változó függvényében):

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_1(x) + u_2(x)). \quad (1)$$

A hullám intenzitását úgy kapjuk meg, hogy ezt az összeget (abszolút értékben) négyzetre emeljük. Az interferenciát a négyzetre emeléskor fellépő vegyes szorzatok összege: $u_1^*(x)u_2(x) + u_2^*(x)u_1(x)$ hordozza (a csillag komplex konjugálást jelent).

Ha ez az anyaghullám kölcsönhatásba lép a környezettel, amelynek koordinátáit tömören a q betűvel jelöljük, az összefonódott hullámfüggvényt közelítőleg így írhatjuk:

$$\Psi(x, q) = \frac{1}{\sqrt{2}}[u_1(x)\chi_1(q) + u_2(x)\chi_2(q)] \quad (2)$$

annak megfelelően, hogy a különböző u_1 és u_2 rész-hullámok a kölcsönhatás által különböző $\chi_1(q)$, illetve $\chi_2(q)$ állapotok felé terelik a környezetet.

Az intenzitást most is négyzetre emeléssel kapjuk meg, de az interferenciát változatlanul csak az anyaghullámon szeretnénk megfigyelni. Ezért a környezet koordinátáira ki kell integrálni. Az interferenciát kifejező vegyes szorzatok emiatt – egységnyi nagyságú fázisszorozóktól eltekintve – megszorozódnak ezzel az integrállal:

$$v = \left| \int \chi_1^*(q)\chi_2(q) dq \right| = |\langle \chi_1 | \chi_2 \rangle|. \quad (3)$$

Ha $\chi_1(q)$ és $\chi_2(q)$ nagyon eltér egymástól (a Hilbert-ter nyelvén szólva: közel ortogonálissá válik), akkor a fenti integrál (skalárszorzat) sokkal kisebb egynél, emiatt lecsökken az interferenciajel amplitúdója, az interferencia láthatósága (angolul „visibility” – ennek rövidítése a V betű). Ez a mechanizmusa a koherencia elvesztésének, a környezeti eredetű dekoherenciának.

Makroszkopikusan különböző állapotok – például egy macska élő és halott állapota – szuperpozícióit mérhetetlenül gyorsan dekoherálja a makroszkopikus testekkel számtalan helyen érintkező környezet. Atomok, kis molekulák, fotonok sokáig őrizhetik koherenciájukat. A kettő között található a jól felszerelt laboratóriumokban létrehozott *mezoszkopikus* rendszerek – ionsztrapok, atomcsapdák, mikrométerek, szupravezető Josephson-áramkörök, félvezető nanoszervezetek – rohamosan bővülő világa, amelyek koherenciája jó esetben egy rövid mérőszorozat elvégzéséig tartható fenn. Az ilyen rendszerekben megfigyelhető *gyenge dekoherencia* elmélete jól kidolgozott apparátussá fejlődött, amely alkalmas konkrét környezeti hatások kvantitatív vizsgálatára. Az elmélet fő eszközei a sűrűségmátrix időbeli változását leíró „kvantum master-egyenletek”, amelyeket olyan gyakorlati területeken is rutinszerűen alkalmaznak, mint a kvantumoptika vagy a mágneses magrezonancia (valójában az egész módszer ez utóbbi területen indult először fejlődésnek).

Hogy a környezeti dekoherencia elmélete a klasszikus–kvantum határ *egész* jelenségkörét leírhatja, ezt az álmod a dekoherencia-elmélet másik híressé vált kutatója, *Wojciech Zurek* csepegtette a fizikusok tudatába 1981 óta írott cikkei sorozatával. Fogalmak egész sorát – mutató-állapotok, jósolhatósági szita, kvantum-darwinizmus stb. – vezette be annak szemléltetésére, hogy részrendszer és környezet bonyolult dinamikájában létrejöhet a klasszikusan stabil állapotok látszólag véletlenszerű kiválasztódása. Az elméletnek ezt az ágát minden intellektuális szépsége mellett is sokan hiányosnak érzik, és nem tekintik a feltett kérdésekre adott meggyőző válasznak.

Kollapszus és vidéke

Mikroszkopikus és makroszkopikus között nincs világos, értelemszerű határ, ezért természetes dolog lenne olyan dinamikai törvényt keresni, amelynek kétféle határesetét jelentenék a Schrödinger-egyenlet és a Newton-törvények. Az előző pont végén tárgyalt elképzeléseket az a némiképpen fundamentalista hit hajtja, hogy ez az áthidaló törvényszerűség maga a lineáris Schrödinger-egyenlet. Ennek azonban ellene szólni látszik, hogy véletlenszerűséget általában nemlineáris jelenségek szoktak létrehozni, aminek az adott konkrét esetben eléggé ékesszóló alátámasztását adja a valószínűségeket megadó Born-szabály kvadratikussága is. Ezért a kezdetektől fogva kézenfekvő törekvés volt, hogy próbáljunk meg óvatosan –

a kvantumelmélet nagyszerű eredményeit el nem rontva – túllépni a törvénytől vált kereteken. Azt a törvényt hosszú időre *Dirac* híres kvantummechanika könyve véste kőtáblába; amiről ezután lesz szó, az „nem-Dirac” kvantummechanika.

„Bohm-mechanika”

A Schrödinger–Dirac kvantummechanika nagyszerű szorításából való kimenekülés legrégebbi stratégiája a kvantumozás hullámtermészetét elsőnek felismerő Louis de Broglie-től származik, de részletes kidolgozásában néhány évtizeddel később *David Bohm* játszott döntő szerepet, ezért többnyire „Bohm-mechanika” néven emlegetik. Ebben a képben pontszerű részecskék mozognak egy nemlokális „vezérhullám” vagy „kvantumpotenciál” hatása alatt, szigorú determinizmusban. A véletlenszerűséget a részecskék kaotikus mozgása tartja fenn (ezt Bohm idejében még nem láthatták ilyen világosan, de ma már nyilvánvaló, hogy enélkül a dolog nem működne); a valószínűségek kialakításában a részecskék kezdeti valószínűségeloszlásának van lényeges szerepe. Részecskék és vezérhullám csatolt dinamikája, némiképpen konspirációszerűen, a mérési eredményeknek éppen a szokásos kvantummechanikával megegyező statisztikáját alakítja ki.

A Bohm-mechanikát a kutatók kicsiny, de lelkes csapata műveli a világban, tágítgatva a kereteket a kvantumtérelmélet felé; a fizikusok többsége nem hiszi, hogy ez az irányzat lényegesen hozzásegítene a fizika megértéséhez.

Spontán kollapszus

A hagyományosnak mondható kvantummechanika egyik irritáló – bár nehezen cáfolható – tulajdonsága a mérési folyamat megkülönböztetett szerepe, amit John Bell is szenvedélyesen ostorozott: miért éppen a részecskedetektorok kattanásihoz kapcsolódik a lineáris Schrödinger-dinamikával zavartalanul kifejlődő szuperpozíciók időnkénti összeomlása – kollapszus – a szuperpozíció egy véletlenül kiválasztott tagjára, és miért éppen arra, amit a megfelelő detektor jelez? Nehezen elfogadható, szubjektív és antropomorf az a többször kimondott elképzelés, hogy mérési eredmények *tudomásul vétele* nélkül a világunk szétfolyna. Ahogy Einstein mondta egyik fizikus kollégájának egy esti sétán: „Te tényleg elhiszed, hogy a Hold nincs ott, ha senki se nézi?”

Egy lehetséges alternatíva az, hogy a kollapszus a méréstől függetlenül, spontán módon, rendszeresen megtörténik, valahányszor a kvantumállapot olyan szuperpozícióvá kezdene szétfolyni, amely valamilyen mennyiségnek, például egy tárgy helyvektorának makroszkopikusan különböző értékeit engedi meg. Annak kiválasztását, hogy milyen érték köré ugorjon össze a hullámfüggvény, valamilyen véletlen folyamat szabályozza, ami az elképzelés szerint része a természet mozgástörvényének.

Ezt matematikailag nem könnyű modellezni. Az 1970-es évek bátortalan próbálkozásai után 1986-ban közölte a *Ghirardi – Rimini – Weber* szerzőhármas azt az egyenletet, amely máig is a véletlen kollapszussal kibővített Schrödinger-egyenlet prototípusának számít. További fejlesztésében *Pearle*, *Gisin* és *Diósi Lajos* nevéhez kapcsolódnak jelentős lépések. Az elmélet máig is él és fejlődik, annak ellenére, hogy az eredeti remények – a kísérleti ellenőrzés lehetősége – eddig nem váltak be: a spontán kollapszust, mint véletlen zajt kellene megfigyelni, de ez a zaj sokkal gyengébb, mint a környezettel való kölcsönhatásból eredő, minden véges hőmérsékleten jelen levő, a dekoherenciáért is felelős véletlen hatás.

Mindmáig nyitott kérdés az is, hogy esetleg valamilyen már ismert fizikai hatás okozza-közvetíti a véletlen kollapszust. Ennek egy ígéretes megközelítését az alábbiakban külön tárgyaljuk, már csak magyar vonatkozásai miatt is.

A gravitációs vonal

A kollapszus magyarázatában szóba jöhető ismert erők közül kiemelt figyelmet kapott a gravitáció. Az, hogy a G , \hbar , c természeti állandókból kikeverhető a megfelelő dimenziójú Planck-hossz, Planck-tömeg és Planck-idő, inkább csak a kinematikai keretét jelenti gravitáció és kvantummechanika összekapcsolódásának. A gravitáció megszelídítése a kvantumtérelmélet keretei között hírhedten nehéz, mindeddig megoldatlan problémaköre az elméleti fizika fő vonalának. Itt azonban nem erről van szó, bár lehet valami távoli kapcsolata történetünkkel (lásd a fejezet végén).

Azt, hogy a gravitációnak valami köze lehet a kvantum és klasszikus közötti határ és a kvantummechanikai mérés problémaköréhez, először Feynman vetette fel 1962–63-as *Lectures on Gravitation* című könyvében. Feynman, akinek – mint a régi görögöknek – minden és mindennek az ellenkezője is az eszébe jutott, nem ment utána egyszeri ötletének. Aki először komolyan vette ezt a lehetőséget, az *Károlyházi Frigyes* volt; ő 1966-os dolgozatában kijelölt egy logikai pályát, amely mentén a gravitáció előidézője lehet a kvantummechanikai kollapszusnak. Később egy ettől különböző logikai kapcsolatot vázolt fel Diósi Lajos (1984, 1987); az ő gondolatmenetét 1996-ban újra felfedezte *Roger Penrose*, aki az azóta népszerűvé vált „Newton–Schrödinger-elmélet” névvel ajándékozta meg a témakört. Ennek egy változatával a jelen cikk írója is foglalkozott (2004).

Miért éppen a gravitációnak lenne esélye arra, hogy megmagyarázza a kvantum–klasszikus átmenet rejtélyes vonásait? Talán mert kicsi és nagy között az átmenetet nem túl sok paraméter mentén tudjuk elképzelni. Ezek egyike a geometriai méret. Ez nem működik: neutronok, atomok, molekulák méteres interferométereken át repülnek, centiméterekre szétváló részecskékben, néha arasznyi koherenciahosszal, és a végén vidáman interferálnak. A másik a tömeg, ami viszont valóban döntő! A C_{60} és hasonló

méretű molekulák, amelyek tömegközépponti mozgásában még sikerült interferenciát létrehozni, 10^{-24} kg tömegűek (ennél jóval nehezebb molekulák interferenciájában a szűk keresztmetszet a sugárforrás: ezeket már nem lehet kályhában elpárologtatni). A létező legkisebb nanomechanikai oszcillátorok tömege viszont 10^{-15} kg körüli, mintegy kilenc nagyságrenddel nehezebb; ezeken eddig nem sikerült kvantumviselkedést látni. Ha pedig a tömeg a lényeg, akkor a gravitáció szerepe kézenfekvően szóba jöhet, mint a jelenségek mélyebb okozója.

Persze az, hogy a nanomechanikai oszcillátorok nem mutatnak kvantummechanikai viselkedést, még nem bizonyítja, hogy ők klasszikus tárgyak! Ennek igazi ellenőrzéséhez a rezgőmozgás kvantummechanikai alapállapotának közelébe, az oszcillátor ν frekvenciájának megfelelő $h\nu/k_B$ hőmérsékletre kellene őket lehűteni (k_B a Boltzmann-állandó). Napjainkra ezt sikerült egy tízes szorzó erejéig megközelíteni, és örületes versenyfutás indult, évente tucatnyi *Nature* és *Physical Review Letters* cikkkel, a hatékonyabb hűtés, valamint kvantumállapot-preparálás és -mérés felé. Közben, megengedve, hogy talán mégis valahol a kilenc nagyságrendnyi tömegrés közepén lép be valami új fizikai hatás, intenzív kutatás indult a repíthető molekuláknál jóval nehezebb szén nanocsövek, valamint ultrahideg csapdázott gázok esetleges kvantummozgásának feltárására is.

Hogy konkrétan hogyan is hatna a gravitáció a kollapszusra, arra van egy egyszerű, de nem feltétlenül igaz válasz: a gravitáció *vonzó* erő, hát persze, hogy össze tudja rántani a kettéhasadt hullámcsomag részeit! Közelebről nézve ez ellenkezik azzal a kvantummechanikai dogmával, hogy kölcsönhatás csak két különböző test között lehetséges, önkölcsönhatás nincs. Lehet azonban, hogy a gravitáció fölülte áll ennek a szabálynak; ez nemlinearitást vinne be a kvantummechanikába, de már említettük, hogy talán éppen az vezetne ki a zsákutcából.

Van egy másik, elvontabb útja is a gravitáció és a kvantummechanika összekapcsolódásának: ez a gravitációnak az *interferenciára* gyakorolt hatása. A gravitáció gyenge erő, amelynek eltérítő hatását csak nagy távolságokra repülő tárgyakon vehetjük észre, de a hullámfüggvény fázisát kis távolságokon is komolyan tudja módosítani. Hasonló a helyzet a gázok optikai interferometriájához: a törésmutató gyenge változásai a fényt csak a délibábhhoz hasonló méretekben tudják eltéríteni, de már a laboratóriumi méretű Rayleigh-interferométerben is jól mérhető fázistolást okoznak.

Károlyházi a gravitációnak ezt a közvetett, az interferenciára gyakorolt hatását ismerte fel. A gondolatmenet összefoglalására válasszuk most azt a kiindulópontot, hogy egy R nagyságú test $\Delta t = R/c$ minimális időbizonytalanságot okoz egy téridőpont kijelölésében. Ehhez a kvantummechanika szerint $\Delta E = \hbar/\Delta t$ energiabizonytalanság tartozik, ami a speciális relativitáselmélet szerint $\Delta M = \hbar/(c^2 \Delta t)$ tömegbizonytalansággal jár együtt. Itt lép be az általános relati-

táselmélet: a tömegbizonytalanság az úgynevezett gravitációs idődilatáció miatt egy t időtartam mérésének az előzőekben bevezetett Δt bizonytalanságához hozzáad egy

$$\frac{G \Delta M}{R c^2} t = \left(\frac{t_p}{\Delta t} \right)^2 t$$

járulékot, ahol

$$t_p = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^5}}$$

a Planck-idő. A két járulékból összetevődő *teljes* időbizonytalanság

$$\delta t = \Delta t + \left(\frac{t_p}{\Delta t} \right)^2 t. \quad (4)$$

Ennek adott t időtartam mellett a kiinduló Δt egy véges értékénél lesz az elérhető minimuma, amelyre teljesül

$$\delta t_{\min} \propto t^{1/3}. \quad (5)$$

Ez az érdekes $1/3$ kitevőjű hatványfüggés Károlyházinak amolyan szakmai névjegyeként szerepel a világban. Az adott megközelítésmód szerint ez a tovább nem csökkenthető időbizonytalanság mossa el az időbeli frekvenciák élességét, és vele a kvantummechanikai koherenciát.

Diósi (és az ugyanazt később újra felfedező Penrose) kiindulása ettől lényegesen különböző. Ők a gravitációt, mint vonzó erőt tekintik, amely a kettéhasadt hullámcsomag („Schrödinger-macska”) két komponense közötti önkölcsönhatásból eredően egy ΔU energiát eredményez. Ez határozza meg a kollapszus $\hbar/\Delta U$ időskáláját: minél nagyobb az önkölcsönhatási energia, annál hamarabb megtörténik a kollapszus. Diósi változata a teljesebb: ő ezt az időskálát beteszi a spontán lokalizáció sztochasztikus dinamikai egyenletébe, és ezáltal konkrét becsléseket ad a várható zaj szintjére.

A Newton–Schrödinger-önkölcsönhatást vehetjük nagyon szó szerint is (Diósi 1984): ha a gravitációt a kvantummechanikán kívül álló klasszikus mezőnek tekintjük, amelynek forrása a kvantummechanikai tömegsűrűség várható értéke (ez a nemlétező kvantumgravitációs elmélet létező átlagtér-közelítése), akkor ez a külső klasszikus mező, visszahatva a kvantumállapotra, egy nemlineáris Schrödinger-egyenlettel leírható dinamikát eredményez.

Erre épül a magam álma ugyanerről a jelenségek körül: én úgy gondolom, hogy egyáltalán nincs spontán kollapszus, hanem a gravitációs vonzás *megakadályozza* a makroszkopikus testek tömegközépponti hullámcsomagjának felhasadását. Így a hullámcsomag egyben maradvá, klasszikus tárgyként mozog, és akadályokba ütközve, kaotikus mozgással hoz létre véletlen eseményeket.

Rossz hír, hogy amíg a lineáris Schrödinger-egyenlet valamiféle hályogkovács biztonságával kerüli el a kvantummechanikában rejlő nemlokalitás súlyosabb bonyodalmaival, a nemlineáris dinamikában ez a biztonság összeomlik, és az elmélet építésekor fáradságos aprómunkával kell kerülgetni a kauzalitást fenyegető buktatókat.

Hogy végülis a gravitáció erős vagy gyenge, hogy pályamódosításon vagy interferencián keresztül befolyásolja hatékonyabban a kvantum–klasszikus határon zajló eseményeket, az nyitott kérdés. Itt kapcsolódhat a történet a kvantumgravitáció területéhez: az elmélet egyes változatai arra utalnak, hogy talán nagyon rövid távolságokon (becsavarodott vagy lelapult extra dimenziók méretén belülről kerülve) a gravitáció sokkal erősebb lehet annál, mint amit a newtoni távolságskálán megismertünk. Ennek kísérleti tesztelése elkezdődött, de egyelőre nehéznek bizonyult a szintén rövidtávú Casimir-erők zavaró hatása miatt.

Epilógus

- A kvantum–klasszikus határ megismerése keményebb dió, mint atyáink gondolták.

- Több mint száz évvel Planck felfedezése, nyolcvan évvel a természettörvénnyé vált kvantummechanika megszületése után már igazán ideje lenne megtalálni a biztonságos átjárást kvantum és klasszikus között.

- Lesszük a kísérleteket a senkiföldje-tömegek világából,

- addig is, gyártjuk az elméleteket.

Az itt áttekintett kérdések iránti érdeklődésemet *Fényes Imrétől* kaptam; kár, hogy nem érthette meg a témakör mai virágzását. Sok részletkérdéssel kapcsolatban Diósi Lajossal való sűrű diszkussziók másfél évtizede formálta a véleményemet. Külön köszönet illeti *Frenkel Andort*, aki segítette megérteni Károlyházi Frigyes eredményeit.

BOSE–EINSTEIN-KONDENZÁCIÓ ÉS KRISTÁLYOSODÁS: A FOLYTONOS SZIMMETRIA SÉRÜLÉSÉNEK KÉT ESETE

Sütő András

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet

Az egyensúlyi statisztikus fizika a múlt század hetvenes éveire elérte teljes érettségét, eszközszerkezere beépült az általános fizikába és azon túl más tudományágakba, hagyományos vizsgálódási területe azonban a nyolcvanas évektől kezdve fokozatosan kicsúszott a fizikusok központi érdeklődési köréből. Hátramaradt néhány be nem vett erőd, megoldatlan probléma. A nehéz problémák ritkán érdektelenek, nem szabad teljesen megfeledkeznünk róluk.

A rácson definiált feladatok közül példaként szolgál három, a mágnességgel kapcsolatos megválaszolatlan kérdés. Az első a háromdimenziós ferromágneses kvantum Heisenberg-modell rendeződési fázisátmenete. Minden fizikus meg van győződve arról, hogy ebben a modellrendszerben kellően mély hőmérsékleten ferromágneses rendeződés történik. A második a négyzetrácson definiált antiferromágneses, feles spinű Heisenberg-modell alapállapota. Ha teljes közmegegyezés nincs is, a többségi vélemény szerint ennek antiferromágneses rendet kell mutatnia. A harmadik megoldatlan probléma az elemi cellájukban egy pontot tartalmazó, úgynevezett Bravais-rácsokon (például az egyszerű, a tércentrált vagy a lapcentrált köbös rácson) értelmezett Hubbard-modell alapállapotának mágneses momentuma. Ez a rendszer az itineráns ferromágnesség – a mozgó elektronok által létesített ferromágnesség – legegyszerűbb modellje lehetne; de hogy valóban az-e, ebben a tekintetben teljes a tanácstalanság. A folytonos térben mozgó ré-

szecskék fázisátmeneteivel még rosszabb a helyzet. Nem tudunk leírni olyan hétköznapi jelenségeket, mint a gázok cseppfolyósodása és a kristályosodás, és hézagos a tudásunk a kölcsönható bozonok Bose–Einstein-kondenzációjáról és a hélium ezzel összefüggő szuperfolyékonyságáról.

Hogy mit értünk tudáson és leírásról, részben egyéni megítélés kérdése. A megértésnek és a leírásnak különböző mélységei vannak. A fent említett jelenségeket az általános fizikai elvek szintjén elég jól értjük, és rendelkezésünkre állnak jó fenomenologikus elméletek is. A hiányérzet abból adódhat, hogy míg az összes problémát matematikai szabotossággal meg tudjuk fogalmazni, képtelenek vagyunk őket ugyanilyen szabotossággal megoldani. Erre lehet legyinteni is, mondván, hogy a közelítő technikák és a numerikus módszerek gyakorlati szempontból mindig kielégítő eredményt adnak. Nehéz azonban megszabadulni attól az érzéstől, hogy amíg élesen felvetett kérdéseinkre nincsenek éles válaszok, addig valamilyen alapvető dolgot nem értünk, valami fontos tényező elkerülte a figyelmünket.

A fent összegyűjtött példák, a gázok cseppfolyósodása kivételével, valamilyen folytonos szimmetria sérülésével és az ezzel együttjáró rendeződéssel kapcsolatosak. A makroszkopikus mágnesség az elemi mágneses momentumok rendeződésével, az izotróp eloszlás sérülésével jelenik meg. A kristály létrejöttekor a gáz- vagy folyadékbéli részecskék térben egyenes-

eloszlása szűnik meg. A Bose–Einstein-kondenzáció során egy kevésbé szemléletes szimmetria, a mértékinvariancia sérül [1, 2], ezt kíséri egy szokatlan, úgynevezett nemdiagonális hosszútávú rend, amely sok részecskére és nagy távolságra kiterjedő fáziskoherenciát jelent. (A lézerrel való hasonlóság nem véletlen: a lézerfény a fotonok Bose–Einstein-kondenzátuma.) Az elmúlt néhány évben jómagam a két utóbbi problémán dolgoztam, a továbbiakban ezekről írok valamilyen részletesebben.

Általánosan igaz az az állítás, hogy a fázisátmenet-hoz kölcsönhatás szükséges. A klasszikus ideális gáz nem cseppfolyósodik és nem kristályosodik, minden hőmérsékleten gáz marad. Az egyetlen ismert kivétel a Bose–Einstein-kondenzáció, amely kölcsönható részecskék között mehet végbe. A jelenség megértése nulla hőmérsékleten a legegyszerűbb. Az egyforma bozonok rendszerét olyan hullámfüggvény írja le, amelyet a részecskék tetszőleges cseréje változtatlanul hagy. Ha a bozonok között nincs kölcsönhatás, akkor energiájuk a kinetikus energiák összege,

$$T = \sum_{i=1}^N T_i,$$

ahol T_i az i -edik bozon kinetikus energiájának operátora. Nulla hőmérsékleten a rendszer a T operátor alapállapotában van, ez pedig nem más, mint a $\phi_0(\mathbf{r}_1) \cdots \phi_0(\mathbf{r}_N)$ szorzatfüggvény, ahol ϕ_0 a T_i operátorok közös alapállapotú hullámfüggvénye. Ez a száz százalékos Bose–Einstein-kondenzáció: minden részecske ugyanabban a kvantumállapotban van. (Fermionok esetében ez az állapot nem megengedett, már két egyforma fermion sem lehet ugyanabban a kvantumállapotban.) Az igazán érdekes azonban pozitív hőmérsékleten történik, és egy *Einstein* kaliberű fizikus kellett ahhoz, hogy a furcsaságot észrevegye. A termikus gerjesztés ki tudja emelni a bozonokat a ϕ_0 állapotból. Adott hőmérsékleten, amíg csak kevés részecske van a rendszerben, néhány kivételével az összes bozon gerjesztett állapotba kerül. A részecskeszám növekedtével azonban a gerjesztett állapotú bozonok sűrűsége eltöltődik egy hőmérsékletfüggő értéken, és a rendszerhez hozzáadott minden további bozon a ϕ_0 egyrészecske-alapállapotba kerül. Ez is Bose–Einstein-kondenzáció, csak nem száz százalékos. Minél alacsonyabb a hőmérséklet vagy minél nagyobb az összsűrűség, a bozonok annál nagyobb hányada foglalja el a ϕ_0 állapotot. Mindez csak a háromdimenziós térben van így. Egy és két dimenzióban nincs telítődés, példázva azt az általános tételt, hogy egy és két dimenzióban, pozitív hőmérsékleten nem sérülhet folytonos szimmetria, így a mértékinvariancia sem.

A Bose–Einstein-kondenzáció tehát tisztán a Bose-statisztikával összefüggő jelenség. De miért olyan reménytelenül nehéz a kimutatása kölcsönható bozonok rendszerében? Miért áll ellen minden bizonyítási kísérletnek hetven év óta? Miért van az, hogy még nulla hőmérsékleten, az alapállapotban sem tudunk

biztosat mondani felőle? Technikailag a probléma azal függ össze, hogy a T operátor spektruma folytonos és rés nélküli, ezért bármilyen gyenge legyen is a kölcsönhatás és bármilyen híg a Bose-gáz, a perturbációszámítás nem alkalmazható kielégítő módon. (A csapdázott Bose-gázok esetében a T operátorhoz hozzáadódik egy, a középponttól távolodva gyorsan növekvő külső E tér. A $T+E$ operátor spektrumában már van egy energiarés az alapállapot felett. Ennek köszönhető, hogy a csapdázott kölcsönható híg Bose-gáz kondenzációja matematikailag is bizonyítható volt [3, 4].) A jelenségek szintjén két okot említhetünk. Az egyik a részecskék kvantummos jellege. Termikus egyensúlyban az őket leíró állapot térbeli kiterjedése a hőmérséklet négyzetgyökével fordítottan arányos, ezért kellően mély hőmérsékleten – bármilyen kevesen legyenek is – a kölcsönható részecskék érzékelik egymás jelenlétét. Ahogy csökken a hőmérséklet, a gáz egyre kevésbé hasonlít az ideális (kölcsönható) Bose-gázhoz. A másik ok, hogy a Bose–Einstein-kondenzációnak van egy vetélytársa, a kristályosodás. A kölcsönható rendszer alapállapota és alacsony hőmérsékleti egyensúlyi fázisa jó eséllyel kristályos. Ha valóban ez a helyzet, akkor olyasmit keresünk, ami nem létezik, legalábbis nem egyensúlyban. Ez a matematikus rémálma, hamis tétel bizonyításán dolgozni. Persze, fennáll egy harmadik lehetőség is, hogy a rendszer részben kristályos, részben Bose-kondenzált. Az ilyen szuperszilárdtestek, amelyek a szuperfolyadék és a kristály jellegzetességeit egyszerre mutatják, ma a kísérleti kutatás izgalmas célpontjai [5, 6]. A versengés a két jelenség között az energiaminimumra (pozitív hőmérsékleten a szabadenergia-minimumra) való törekvésből ered, és abból, hogy a kinetikus és a kölcsönhatási energia nem minimalizálható egyidejűleg. A kinetikus energia a Bose-kondenzátumban a legalacsonyabb, a kölcsönhatási energia pedig a kristályban (tényleg? – erre visszatérünk). A rendszer választása a három lehetőség közül a részecskék tömegétől, a kölcsönhatás részleteitől és a külső körülményektől egyaránt függ.

Az előbbiek tanulsága az, hogy a Bose–Einstein-kondenzáció és a kristályosodás összefüggő problémák, egyszerre értjük vagy nem értjük őket. Ez a megállapítás alacsony hőmérsékletre érvényes, amikor a kvantumeffektusok döntőek. Klasszikusan a Bose–Einstein-kondenzáció nem létezik, a kristályosodás viszont, mint normális (nem extrém) hőmérsékleten végbemenő folyamat, része a klasszikus fizikának is. A klasszikus statisztikus fizikában a részecskék impulzusának és helyzetének eloszlása független egymástól. Az impulzusok egymástól is függetlenek, eloszlásuk termikus egyensúlyban a jól ismert Maxwell-eloszlás. A kristályosodás a részecskék helyzetének eloszlásfüggvényéből olvasható ki. Klasszikusan tehát a kristályosodás egyszerűbb feladat, mint kvantumosan, de ettől még éppoly megoldatlan, mint kvantumosan. És a probléma nem pusztán a folyadék és a kristály közötti fázisátmenet kérdése, hanem már a kristályos alapállapot létezése is!

Vizsgáljuk meg ezt a kérdést kicsit közelebbről. Rendeződési fázisátmenetet nehéz úgy bizonyítani, ha nem tudjuk, milyen rendet keressünk. Egy rendszerben több fázisátmenet is történhet. A legalacsonyabb hőmérsékleten végbemenő rendeződési átmenet a nulla hőmérsékleti, alapállapotú rendet hozza létre. Ismernünk kell tehát a rend mikéntjét legalább a rendszer alapállapotában. Rácson értelmezett spinmodellek esetében, amelyekre a fázisátmenet bizonyítható volt, ez a minimális ismeret többnyire triviálisan rendelkezésre állt. A kristályosodással más a helyzet: rögzített sűrűségen is kontinuum számosságú különböző atomi elrendeződés létezik, ezek között kell megtalálni azokat, amelyek minimálissá teszik az energiát. Nemcsak a kristályrács típusát nem ismerjük, hanem arra sincs garanciánk, hogy az alapállapotú konfigurációk egyáltalán periodikusak. Az alapállapotú konfigurációk megtalálása globális minimalizálási feladat, amelynek megoldására általános párkölcsönhatás esetén nincs módszerünk. Van azonban a kölcsönhatásoknak egy olyan osztálya, amelyre sikerült az alapállapotú konfigurációkat azonosítani [7, 8]. Írásom hátralévő részében ezt az eredményt ismertetem.

A munka fogalmi tisztázással kezdődik. Az atomokat pontokkal, $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots$ ábrázoljuk, feltesszük, hogy csak páronként hatnak kölcsön, és hogy egy $\{\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j\}$ pár energiája csak a különbségvektortól függ, tehát egy $u(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$ alakú függvény, amely nullához tart $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ növekedtével. A rendszer stabilitásához (a kolapszus elkerüléséhez) szükséges, hogy az atomok egymáshoz közelítése energiába kerüljön, tehát $u(\mathbf{r}) > 0$ legyen $|\mathbf{r}|$ kis értékeire. Feltesszük azonban, hogy a taszítás nem végtelenül erős egybeeső helyzetben sem, azaz $u(\mathbf{0}) < \infty$. Ha véges sok atomot egy korlátos tartományba zárunk, az energia véges lesz. Ilyenkor az alapállapot definíciója egyszerű: alapállapot minden konfiguráció, amely az energiát minimálissá teszi. Látható azonban, hogy az energiaminimum és az őt megvalósító konfiguráció függ a tartomány alakjától. Ettől az esetleges és a feladatot végeredményben megnehezítő vonástól megszabadulhatunk, ha az alapállapot fogalmát a végtelen pontrendszer körében definiáljuk. Ekkor a teljes energia végtelen, minimalizálása nem értelmes feladat. A fajlagos energia – az egységnyi térfogatra eső energia – minimalizálása már értelmes, de nem elég szelektív. A jó definíció a lokális stabilitásra épül: alapállapot az olyan végtelen konfiguráció, amelynek energiája nem csökkenhet tetszőlegesen nagy számú, de véges sok atom véges távolságon való elmozdításával. Mivel az energiakülönbségek végesek, elvben tetszőleges végtelen konfigurációról eldönthető, alapállapot-e vagy sem. Gyakorlatban a konfigurációk egy családjára kell szorítkozni, és azon belül keresni a lokálisan stabil konfigurációkat. Fontos azután megvizsgálni, hogy az azonosított alapállapot fajlagos energiája minimális-e, legalábbis az adott sűrűségű konfigurációk körében. Ha igen, a megtalált alapállapotot nevezhetjük globálisan stabilnak, ha nem, metastabilnak.

A kristályokban az atomok periodikusan helyezkednek el, ezért azt várjuk, hogy a legtöbb kölcsönhatásnak periodikus az alapállapota. A periodikus rendszerek tanulmányozásának egy igen hatékony eszköze a Fourier-analízis, ez vezetett célra a jelen esetben is. Mindenekelőtt fel kellett tételezni, hogy a párkölcsönhatás Fourier-sorba fejthető, azaz felbontható szinusz- és koszinusz hullámok súlyozott integráljára. További megszorítás, hogy a súlyozó tényező, az $u(\mathbf{r})$ kölcsönhatás $v(\mathbf{k})$ Fourier-transzformáltja, pozitív egy adott K_0 hullámszámérték alatt, és nulla felette. (A hullámszám a hullámhossz reciproka, a hosszegységre eső hullámok száma. A Fourier-analízis a háromdimenziós térben háromdimenziós \mathbf{k} hullám(szám)vektorokat használ, amelyek komponensei a tér három irányában haladó hullámok hullámszámjai. A K_0 érték e vektorok hosszára vonatkozik: $v(\mathbf{k}) > 0$, ha $|\mathbf{k}| < K_0$ és $v(\mathbf{k}) = 0$, ha $|\mathbf{k}| \geq K_0$.) Már volt róla szó, hogy a legegyszerűbb periodikus szerkezetek a Bravais-rácsok, ezek egyetlen atomot tartalmaznak az elemi cellájukban. Minden rácspontnak ugyanolyan a relatív helyzete a rács egészéhez képest, és ezért minden egyes atomnak ugyanaz az összegezett kölcsönhatási energiája a rács összes többi atomjával. Ezt a B Bravais-rácson futó végtelen összeget egy klasszikus, *Poisson*tól származó képlet segítségével fel lehet írni egy másik, általában végtelen összeg alakjában, amely egy B^* Bravais-rácson, a B duális- vagy reciprokrácsán fut, az összegezendő mennyiség pedig $v(\mathbf{k})$ a B^* pontjaiban. Mivel most a Fourier-transzformált nulla a K_0 -nál hosszabb hullámvektorokra, a végtelen összeg végessé redukálódik. Ebben a véges összegben mindig ott van a nulla hullámvektor szerkezettől független $v(\mathbf{0})$ járuléka, mert az origó minden reciprokrácsnak közös pontja. A duális rácpárok fontos tulajdonsága, hogy sűrűségeik szorzata állandó. Ha az atomok Bravais-rácsának ρ sűrűsége nő, a reciprokrács sűrűsége csökken, és előbbutóbb B^* minden nemnulla vektorának hossza meghaladja K_0 -t, amelynél $v(\mathbf{k})$ eltűnik. A sűrűség, amelynél ez megtörténik, függ a rács típusától. A különböző típusú, de egyforma ρ sűrűségű rácsokat összehasonlítva: Azon rácsok fajlagos energiája, amelyek duálisának nincs K_0 -nál rövidebb nemnulla vektora, egy közös, a szerkezettől független e_ρ érték, míg az olyan rácsok fajlagos energiája, amelyek duálisának a ρ sűrűségen van a K_0 -nál rövidebb nemnulla \mathbf{K} vektorral megadott pontja, ennél nagyobb, $v(\mathbf{K})$ pozitív járulékanak köszönhetően. Belátható, hogy létezik egy legkisebb sűrűség és egyetlen, ehhez tartozó B rács, amelynél B^* legrövidebb nemnulla vektorának éppen K_0 a hossza. Három dimenzióban ez a sűrűség

$$\rho^* = \frac{K_0^3}{8\sqrt{2}\pi^3}$$

B pedig a tércentrált köbös rács. Ez azt jelenti, hogy a ρ^* sűrűségen a tércentrált köbös rács fajlagos energiája kisebb, mint bármelyik más Bravais-rácsé; ha tehát a tércentrált köbös rács lokálisan stabil, akkor a Bravais-rácsok között ez az egyetlen alapállapot.

A Fourier-analízis kiterjeszhető volt a lokális stabilitás vizsgálatára is, és meg lehetett mutatni, hogy a ρ^* sűrűségen a tércentrált köbös rács az egyetlen alapállapot nemcsak a Bravais-rácsok között, hanem a konfigurációk egy nagyobb családján belül, amely a periodikus konfigurációkat és ezek unióit tartalmazza. Ha a sűrűség ρ^* -nál nagyobb, az alapállapotok között más Bravais-rácsok és ezek periodikus és nemperiodikus uniói is megjelennek. A fajlagos alapállapot energiája minden esetben e_p , és ez az érték az adott sűrűségen elérhető abszolút minimum. A megtalált alapállapotok tehát globálisan stabilak.

Felvetődik a kérdés, mi a köze mindennek a természetben végbemenő kristályképződéshez? A párkölcsönhatás korlátossága a szerves kristályok (sók, fémek) körében nem reális feltevés. Érvényesül ugyanis a Pauli-elv, amely gyakorlatilag végtelenül erős taszításban nyilvánul meg az atomok, ionok átlapolása esetén. Molekulák, polimerek kristályai azonban jól leírhatók a tömegközéppontok közötti párkölcsönhatással, és a tömegközéppontok átlapolásának nincs fizikai akadály. Másrészt, a párkölcsönhatás módosítható egy véges hatósugarú, tetszőleges erősen taszító kölcsönhatás hozzáadásával. A fent leírt eredmények még érvényben maradnak egy felülről is behatárolt sűrűségtartományban [8]. A $v(\mathbf{k})$ Fourier-transzformáltra tett két feltevés erősen megszorító jellegű, azonban a természetben léteznek ilyen effektív erők a

fémbebeli ionok között. Valóban, $v(\mathbf{k})$ levágása K_0 -nál az u potenciálban oszcillációt és hatványfüggvény szerinti lecsengést idéz elő, és megkapható ily módon a fémfizikából ismert Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida- vagy Friedel-potenciál. Az alkalmazhatóságot leginkább az korlátozza, hogy az eredmény a ρ^* -nál kisebb sűrűségekre nem érvényes.

Beszámolómat azzal kell zárjam, hogy mind a Bose–Einstein-kondenzáció, mind a kristályosodás problémája a tagadhatatlan előrelépés ellenére lényegében megoldatlan. Íme két szép feladat a matematikai fizikusok újabb nemzedéke számára.

Irodalom

1. A. Sütő: Equivalence of Bose–Einstein condensation and symmetry breaking. *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 080402.
2. E. H. Lieb, R. Seiringer, J. Yngvason: Justification of c-number substitutions in bosonic Hamiltonians. *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 080401.
3. E. H. Lieb, R. Seiringer: Proof of Bose–Einstein condensation for dilute trapped gases. *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002) 170409.
4. A. Sütő: Thermodynamic limit and proof of condensation for trapped bosons. *J. Stat. Phys.* 112 (2003) 375–396.
5. E. Kim, M. H. W. Chan: Probable observation of a supersolid helium phase. *Nature* (London) 427 (2004) 225.
6. E. Kim, M. H. W. Chan: Observation of superflow in solid helium. *Science* 305 (2004) 1941.
7. A. Sütő: Crystalline ground states for classical particles. *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 265501.
8. A. Sütő: From bcc to fcc: Interplay between oscillating long-range and repulsive short-range forces. *Phys. Rev. B* 74 (2006) 104117.

SZOCIOFIZIKA: HUMÁN KAPCSOLATOK HÁLÓZATA NAGY SKÁLÁN

Palla Gergely
MTA–ELTE Statisztikus és Biológiai Fizika Tanszék
Kertész János
BME Fizikai Intézet

A hálózatok kutatás igazi multidiszciplináris tudomány, matematikusok, fizikusok, vegyészek és biológusok egyaránt hozzájárulnak. A „kemény” tudományok művelőit talán meglepi, de ez a terület sokat köszönhet a szociológiának is, amelynek keretében már a 30-as évektől kezdve tanulmányoztak emberek kis méretű kapcsolati hálózatokat, és fontos felismeréseket tettek. (Itt meg kell említeni a világhírű *Mérei Ferenc* nevét.) Az adatgyűjtés alapvető eszközei a kérdőívek voltak. Az ilyen vizsgálatok előnye, hogy a kapcsolatokról nagyon részletes információkat lehet kapni: milyen az ismeretség, milyen erős a kapcsolat, mennyire

kölcsönös, érzelmileg hogyan viszonyulnak egymáshoz a vizsgált személyek stb. Ezzel szemben nagy hátrány, hogy az ilyen módon tanulmányozható minta mérete erősen korlátozott, továbbá a válaszokból a szubjektivitást nem lehet teljesen kiszűrni.

A hálózati megközelítés közben nagy sikereket hozott biológiai, technológiai és gazdasági problémák vizsgálatánál is, amelynek eredményeként mára a komplex hálózatok témaköre önálló, interdiszciplináris tudományterületté fejlődött [1]. Fontos szerep jutott ezen a téren a fizikusoknak is, ugyanis a sok kölcsönható alegységből álló rendszerek tárgyalására kidolgozott statisztikus fizikai megközelítés rendkívül gyümölcsözőnek bizonyult. Ez a fajta megközelítés több fontos új eredménnyel bővítette a korábbi, kisméretű társaskapcsolat-hálózati mintákon szerzett ismereteket. Az információtechnológia utóbbi két évtizedben bekövetkezett rohamos fejlődésének köszönhetően olyan új lehetőségek nyíltak meg az emberi

A szerzők kutatásait az OTKA K68669 és K60456 jelű pályázatai támogatták.

A szerzők köszönettel tartoznak Szabó Gábornak, Barabási Albert-Lászlónak és Vicsek Tamásnak, valamint az ezen cikk alapjául szolgáló korábbi publikációk további társszerzőinek is.

kapcsolathálózatok feltérképezésére, amelyek révén akár több millió személyt tartalmazó minták is vizsgálhatók.

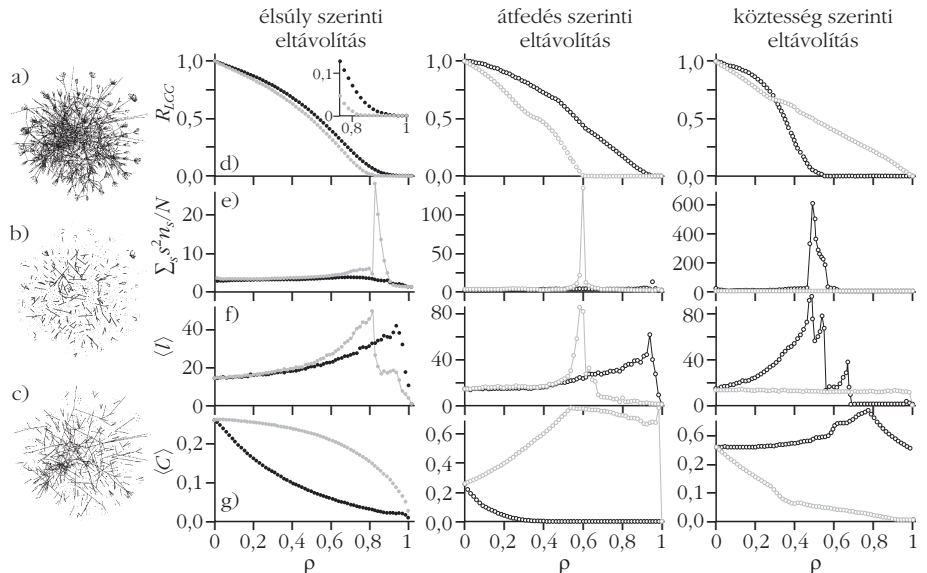
A továbbiakban egy több mint 4 millió fős mobiltelefonhívási hálózat legfontosabb statisztikus tulajdonságait ismertetjük. A kérdőíves adatgyűjtéssel szemben itt csak korlátozott és közvetett, de ugyanakkor objektív információ áll rendelkezésre az egyes kapcsolatokról: kéthetes periódusokra aggregálva a hívások száma, összesített ideje és költsége. Ezeket az adatok alapján megszerkesztett hálózatban az adott kapcsolat erősségére jellemző élsúlyként lehet szerepeltetni. A nem személyes ismerettséghez kötődő hívások kiszűrésének érdekében csak azokat a kapcsolatokat vettük figyelembe, amelyeknél mindkét irányban volt hívás.

A súlyozott hálózatok fontos jellemzői a csúcsok *fokszám- és súlyerősség-eloszlása*. (Egy adott csúcs fokszáma a kapcsolatainak száma, míg erőssége a hozzá kapcsolódó élek súlyainak összege.) A vizsgált telefonhívási hálózat esetén mindkét eloszlás lassan cseng le [2, 3]. Ez arra utal, hogy ugyan csekély számban, de vannak a hálózatban olyan csúcsok, amelyek kiugróan sok kapcsolattal, illetve nagy erősséggel rendelkeznek.

A fokszámeloszlás és a súlyerősség-eloszlás hasonló viselkedése felveti azt a kérdést, hogy mennyire korrelált ez a két mennyiség. Amennyiben semmilyen korreláció nem lenne egy adott csúcshoz kapcsolódó élek súlya és a csúcs fokszáma között, akkor a csúcs erősségét jól becsülhetnénk fokszámának és a teljes hálózatban mért átlagos élsúly szorzataként. Ezzel szemben a tapasztalat azt mutatta, hogy a csúcsok erőssége a fokszámmal a lineárisnál lassabban nő, ami azt jelenti, hogy aki sok ismerőssel folytat telefonbeszélgetéseket, annak általában kevesebb ideje marad egy-egy emberre [2, 3].

A fentiek alapján természetesen adódik az a kérdés, hogy mi határozza meg az élek erősségét egy társas kapcsolati hálózatban? *M. Granovetter*, a szociális hálózatok egyik legnevesebb amerikai kutatója a következő érdekes hipotézissel állt elő még a hetvenes években [4]:

- két ember kapcsolatának erőssége az egymáshoz szentelt idő, anyagi ráfordítás, érzelmi intenzitás, bizalom és kölcsönös segítség/szívesség kombinációja,
- és ez monoton növekvő függvénye a két ember közös ismerősei relatív hányadának a kettejük összes ismerőiséhez viszonyítva. Ez utóbbi mennyiséget a két személy *relatív éltárfedésének* nevezzük.



1. ábra. Perkolációs vizsgálatok. a) egy kis részlet a hálózatból, b) ugyanez a részgráf az élek 80%-ának eltávolítása után, a gyengébb élektől az erősebbek felé haladva ($\rho = 0,8$, szürke görbe), valamint c) az erősebbek felől a gyengébbek felé haladva ($\rho = 0,8$, fekete görbe). A második, harmadik és negyedik oszlopban az élsúly, a relatív éltárfedés és a közteség szerint kialakított élsorrendhez kapcsolódó eredmények vannak feltüntetve; a fekete görbék esetén a nagyobb értékektől a kisebbek felé halad az éltávolítás, míg a szürke görbékénél fordítva. A vízszintes tengely minden ábrán az eltávolított élhányadnak, ρ -nak felel meg. A d), e), f) és g) sorokban a függőleges tengelyen rendre az R_{cc} tendparaméter, a $\sum_i s_i^2 n_i / N$ szuszceptibilitás (N a csúcsok száma), az $\langle l \rangle$ átlagos távolság, illetve a $\langle C \rangle$ átlagos klaszterezettségi együttható látható.

A tanulmányozott mobilhívási hálózat ideális terepet nyújt ezen hipotézis nagy skálájú vizsgálatára. Az élek súlya (a hívások ideje vagy száma két felhasználó között) ugyan nem ad lehetőséget például a felhasználók közötti bizalom felmérésére olyan módon mint egy kérdőíves szociometria, de tartalmazza a Granovetter-féle erősség néhány elemét (idő-, illetve anyagi ráfordítás), és így várhatóan jól tükrözi a kapcsolatok intenzitását, erősségét; a mintában szereplő csúcsok rendkívüli nagy száma pedig jó statisztikát biztosít. Az eredmények egy, a kötések 95%-áig határozottan emelkedő relatív átfedési görbét mutattak az élsúly függvényében [2, 3], azaz a hipotézis beigazolódt.

Ezen eredmény révén igen szemléletes, kvalitatív képet kaphatunk a hálózat felépítéséről. Az erős élek olyan személyeket kötnek össze, akiknek viszonylag sok a közös ismerőse, így várhatóan egy közösséghez (baráti kör, család stb.) tartoznak. Ezzel szemben a gyenge élek olyan csúcsokat kötnek össze, amelyeknek kicsi a relatív éltárfedése, ezért várhatóan más-más közösségek tagjai. Másként megfogalmazva az erős élek közösségek, csoportosulások összetartását jellemzik, míg a gyenge élek a csoportokat, közösségeket kapcsolják össze. Az erős és gyenge élek szerepének illetően szétválása Granovetter másik híres hipotézise, a *gyengeél-hipotézis* [4].

A fenti hipotézist igazolják a hálózat *perkolációs tulajdonságaival* kapcsolatos vizsgálatok is [2, 3]. A csúcsok 84%-a egy összefüggő, óriás komponensből alkotja a hálózatban (ezen belül bármelyik csúcsból el lehet jutni bármely másikba az éleken keresztül), ám a hálózat éleit fokozatosan eltávolítva, egy ponton ez a komponens szétesik sok apró izolált csoportra (részgráfra),

amelyek mérete már elhanyagolható a teljes hálózatéhoz viszonyítva. Ez az átalakulás megfelel a statisztikus fizikában tanulmányozott perkoláció jelenségének. Az óriás komponens eltűnése érdekes módon máshol következik be attól függően, hogy az éleket milyen sorrendben távolítjuk el. Egyik lehetőség az élsúly szerinti emelkedő, illetve ereszkedő sorrend, vagy az él által összekapcsolt csúcspár relatív éltárfedése szerinti emelkedő, illetve ereszkedő sorrend. Egy további lehetőséget nyújt a sorrend kialakítására az élek *köztessege* is. Egy él köztessege a hálózatban található összes lehetséges csúcspárt összekötő legrövidebb utak közül azoknak a száma, amelyek rajta áthaladnak.

Az átalakulás kontrollparamétere minden esetben az eltávolított élek ρ hányada, a rendparaméter pedig a legnagyobb összefüggő komponens (largest connected component) R_{LCC} relatív mérete az eredeti állapothoz képest. Definiálható egy, a szuszceptibilitással analóg mennyiség is,

$$S = \sum_s s^2 n_s,$$

ahol n_s az s méretű komponensek számát jelöli; ennek a mennyiségnek éles csúcsa van az átalakulás kritikus pontjánál. A vizsgálat eredményeit az 1. *ábra* mutatja be. Az első oszlopban egy kisebb részgráf látható eredeti állapotában, valamint az élek 80%-ának eltávolítása után, egyszer a kis élsúlytól a nagyobb felé haladva, egyszer meg ellentétes sorrendben. A másik három oszlop a háromféle (élsúly, relatív éltárfedés, köztessege alapján kialakított) éltávolítási-sorrend mellett kapott eredményeket mutatja be. A fekete színű görbéknel a hálózat ritkítása a nagy értékkel rendelkező élektől halad a kisebb értékűek felé, a szürke görbéknel fordítva. A rendparaméter és a szuszceptibilitás mellett a csúcsok $\langle l \rangle$ átlagos távolsága (minden lehetséges csúcspár közötti legrövidebb utak átlagos hossza) és a $\langle C \rangle$ átlagos klaszterezettségi együttható is fel van tüntetve. (Az i -ik csúcshoz tartozó C_i az i -ik csúcs szomszédai közt lévő kapcsolatok száma osztva a szomszédok között lehetséges kapcsolatok maximális számával.) A görbék alapján egy fázisátalakulás történik az él eltávolítás során, amennyiben kis élsúlyoktól haladunk a nagyok felé, vagy a kis relatív éltárfedésektől a nagyok felé, illetve a nagy köztessegek felől a kicsik felé. (Egyrészt a rendparaméter egy ponton lecsökken gyakorlatilag nullára, másrészt ugyanitt egy éles csúcs jelenik meg a szuszceptibilitásban.) Ezzel szemben nincs fázisátalakulás, ha megfordítjuk az élkivétel sorrendjét [2, 3].

A csúcsok átlagos távolsága intenzívebben nő, ha a kis súlyú, kis relatív éltárfedésű, nagy köztesességű élektől kezdjük az élek eltávolítását (1. *ábra*, f sor). Ez a jelenség arra a hídszerepre világít rá, amit ezek az élek betöltenek, biztosítva a sűrűbb, nagyobb élsúlyú tartományok közti gyors összeköttetéseket [2, 3].

A klaszterezettségi együttható nagy olyan felhasználók esetén, akiknek ismerősei egymásnak is ismerősei, illetve kicsi ellenkező esetben. Ennek fényében érthető, hogy $\langle C \rangle$ érzékenyen reagál arra, ha a nagy

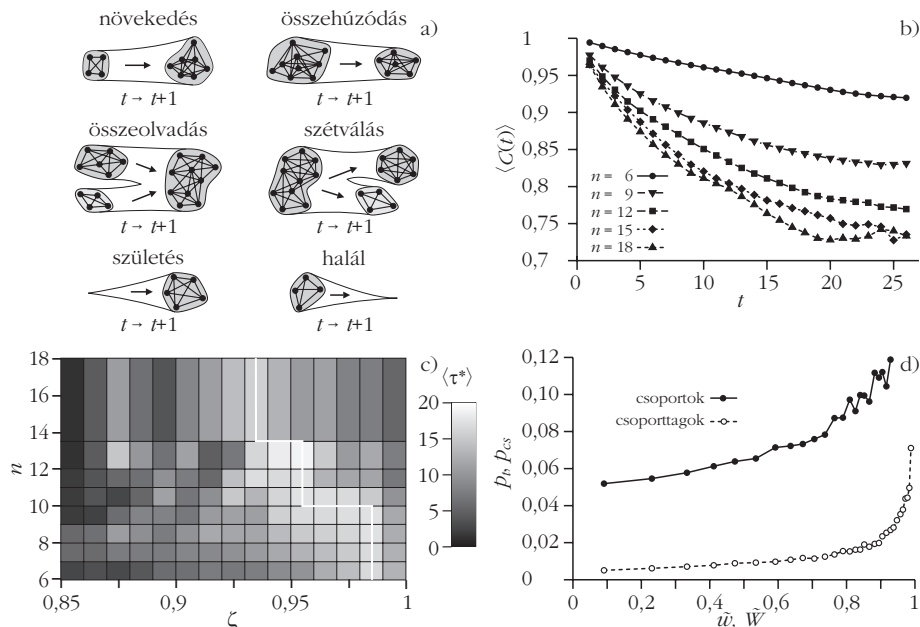
súlyú, nagy relatív éltárfedésű, kis köztesességű élek felől kezdjük a hálózat ritkítását (1. *ábra*, g sor), hiszen ezek az élek várhatóan sok háromszögben vannak benne, és eltávolításuk drasztikusan csökkenti $\langle C \rangle$ -t. Ezzel szemben például a kis relatív éltárfedéshez tartozó élek (a sűrű tartományokat összekötő „hidak”) eltávolítása növeli az átlagos klaszterezettségi együtthatót [2, 3].

Összegezve a perkolációs vizsgálatok eredményeit azt mondhatjuk, hogy a gyengeél-hipotézis beigazolódott nagy skálán is. Az eredeti sejtésen felül az is kiderült, hogy az élek két eltérő szerepe, (közösségek belső összetartása, illetve eltérő közösségek közötti hidak létrehozása), nemcsak élsúly szerint választható el egymástól, hanem legalább olyan jól a relatív éltárfedés, illetve a köztessege alapján is. Természetesen a hálózati szerkezetnek mélyreható következményei vannak az információterjedésre [2, 3].

Koncentráljunk most a már említett sűrű, erős élekkel összetartott *csoportosulásokra*, *közösségekre*. Ezek a való életben egy-egy baráti körnek, családnak, munkahelyi közösségnek, vagy egyéb olyan társaságnak felelnek meg, amelynek tagjai jól ismerik, és ennek megfelelően gyakran hívják egymást. A hálózati csoportosulások nagyon fontos szerkezeti egységeket alkotnak más, például biológiai hálózatokban is, és egyelőre nincs egy egységesen elfogadott, általános definíciójuk. A vizsgált mobilhívási hálózat esetén a *klikk perkolációs módszerrel* (clique percolation method, CPM) történt a csoportosulások azonosítása [5]. Ez a módszer k darab csúcsból álló, teljesen összekötött részgráfokat (k -klikkeket) használ a csoportosulások felépítéséhez. Két k -klikket akkor mondunk szomszédosnak, ha csak egyetlen csúcsban különböznek egymástól, azaz $k-1$ csúcsuk közös. Egy CPM segítségével kapott csoportosulás olyan k -klikkekből épül fel, amelyek közül bármelyikből eljuthatunk bármely másikba szomszédos k -klikkeken keresztül.

A CPM segítségével feltárt csoportosulásokon belül az átlagos élsúly szignifikánsan magasabb értéket vesz fel, mint a csoportok között húzódo éleken. Emellett a felhasználókról rendelkezésre álló (igen limitált) egyéb információk is alátámasztják a csoportosulások hitelességét: a felhasználók kora, illetve lakóhelyük irányítószáma egy-egy csoportosuláson belül sokkal jobban hasonlít egymásra, mint egy ugyanakkora, a teljes hálózatból véletlenszerűen kiválasztott felhasználókból álló csoport esetén.

Mint említettük, a hívási adatok kéthetes időszakokra összegezve álltak rendelkezésre, ezért lehetőség nyílt a *csoportosulások időfejlődésének* tanulmányozására [5]. Az idő előrehaladtával egy adott csoport összetétele új tagok csatlakozásával, illetve régi tagok kiválásával változhat, a csoport mérete nőhet vagy csökkenhet, csoportosulások összeolvadhatnak vagy szétszakhadhatnak, teljesen új csoportok jöhetnek létre, és régi-ek tűnhetnek el. Ezeket az alapvető folyamatokat szemlélteti a 2. *ábra*. Egy csoportosulás „életútját” a kéthetes időközökkel rögzített pillanatképekből kell fel-fűzni, azaz a szomszédos időlépéseknél talált csoporto-



2. ábra. Csoporthozzáadásdinamika. a) Alapvető folyamatok a csoporthozzáadás időfejlődésében. b) A csoporthozzáadások átlagos autokorrelációs függvénye. c) A csoporthozzáadások $\langle \tau^* \rangle$ várható élettartama (színkódolva), a ζ stacionaritás és az n csoportméret függvényében. d) A csoportelhagyás p_r valószínűsége a \tilde{w} függvényében, valamint a csoportszétesés p_{cs} valószínűsége a \tilde{W} függvényében.

sulásokat egymáshoz kell illeszteni, hogy lássuk melyik csoport mivé alakul az adott időlépés alatt.

A csoportösszetétel időbeli változását a $C(t)$ autokorrelációs függvény segítségével lehet egyszerűen nyomon követni, amely a csoporthozzáadás kezdeti és a t időpontban tapasztalt tagösszetételeinek relatív átfedésével egyenlő. (A relatív átfedés – a korábban tárgyalt relatív élettartamhoz hasonlóan – a közös tagok számának és az összes előforduló tagok számának hányadosa.) Amennyiben a csoporthozzáadás időben állandó, vagy csak egy-két tagja változik, akkor $C(t)$ egyhez közeli értéket vesz fel, míg egy gyorsan változó csoport esetén hamar a nullához közelít. A 2.b ábra az autokorrelációs függvény átlagos viselkedését mutatja különböző csoporthozzáadás méretek esetén. Amint látható, minél nagyobb egy csoporthozzáadás mérete, $\langle C(t) \rangle$ annál gyorsabban cseng le. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb csoporthozzáadások relatíve gyorsabban változnak, mint a kicsik [5].

A csoporthozzáadások változékonyságának (vagy időálló voltának) jellemzésére be lehet vezetni a stacionaritás ζ mennyiségét, amely egyszerűen a csoporthozzáadás szomszédos időlépésekben tapasztalt tagösszetételeinek relatív átfedése, átlagolva a csoporthozzáadás életútján. Az időben nagyon stabil, keveset változó csoporthozzáadások egyhez közeli ζ értékkel rendelkeznek, míg a gyakran változók alacsonyabbal, hiszen a definícióból következően egy időlépés alatt a tagok $1-\zeta$ hányada cserélődik ki átlagosan. A stacionaritás, valamint az n csoporthozzáadásméret nemtriviális összefüggésben van a csoporthozzáadás várható $\langle \tau \rangle$ élethosszával (azon időlépések száma, amelyek alatt a csoporthozzáadás jelen van a hálózatban). Az élethossz tekinthető a körülményeknek való megfelelés mértékének: a jól megfelelő csoporthozzáadások sokáig élnek,

a körülményekhez nem illeszkedő csoportok hamar eltűnnek. A 2.c ábra $\langle \tau \rangle$ -t mutatja színkódolás segítségével ζ és n függvényében. Érdekes módon az optimális stacionaritásérték – ami mellett a legnagyobb az átlagos élethossz – alacsonyabb értékek felé tolódik el a csoporthozzáadás növekvő méretével. (Ugyanezt a viselkedést mutatták egy másik, tudományos társszerzőségi kapcsolatból álló hálózat csoporthozzáadásai is [5].) Ez azt jelenti, hogy a kis csoporthozzáadások várhatóan akkor maradnak fenn sokáig, ha nem változik az összetételük, tagjaik nagyon szorosan ragaszkodnak egymáshoz és nem engednek be új tagokat. Ezzel szemben a nagyméretű csoporthozzáadások állandóan meg kell újulniuk a fennmaradás-

hoz, ezért optimális esetben összetételük gyorsan változik új tagok felvételével és régiak távozásával. Ez a fajta viselkedés például nagyobb munkahelyi közösségekre, sportklubokra jellemző, ahol rövid idő alatt akár a teljes tagösszetétel lecserélődhet, ennek ellenére az adott cég vagy sportklub tovább él.

Korábban bemutattuk, hogy az élsúlyok alapján miként lehet egy-egy él hálózatban betöltött szerepére következtetni. Az élsúlyok a csoporthozzáadások tekintetében is hordoznak fontos információkat, amelyek alapján megjósolható, hogy egy adott tag milyen valószínűséggel hagyja ott a csoporthozzáadást, illetve, hogy maga a csoporthozzáadás milyen valószínűséggel szűnik meg a következő időlépésben [5]. Ehhez célszerű definiálni a $\tilde{w} = w_{ki}/(w_{ki} + w_{csop})$ mennyiséget az egyes csoporttagokra vonatkozóan, ahol w_{ki} az adott tag csoporton kívüli kapcsolatainak összessége, míg w_{csop} a csoport többi tagjához kötődő élek összessége. Hasonló módon lehet a teljes csoportra vonatkozóan megadni a $\tilde{W} = W_{ki}/(W_{ki} + W_{csop})$ mennyiséget, ahol W_{ki} a csoportból a csoporton kívülre menő élek összessége, valamint W_{csop} a csoporton belüli élek összessége. A 2.d ábrán a \tilde{w} , illetve a \tilde{W} függvényében mutatjuk annak a p_r és p_{cs} átlagos valószínűségét, hogy a következő időlépésben az adott tag kilép a csoportból, illetve az adott csoport felbomlik. Mindkét esetben, a természetes várakozásnak megfelelően (miszerint minél nagyobb a külső élek relatív súlya, annál valószínűbb a kilépés vagy a felbomlás), a görbék emelkedő tendenciát mutatnak.

Összefoglalva a legfontosabb eredményeket elmondhatjuk, hogy a modern információs technológiának köszönhetően megnyílt az út a nagy skálájú társas kapcsolati hálózatok statisztikus vizsgálata előtt. A tárgyalt több millió felhasználót tartalmazó mobilhívási

hálózat analízise igazolta a szociális hálózatok élsúlyai-
ra, illetve a gyenge élek szerepére vonatkozó hipotéziseket,
feltárta az élsúlyok, valamint a hálózat lokális és globális
szerkezete közötti összefüggést. A hálózatban található
sűrű csoportosulások időfejlődésénél érdekes eltérés volt
tapasztalható a kis és nagy méretű csoportosulások
hosszútávú túlélési stratégiájában. Ezek az eredmények
fontos kiindulópontot szolgáltatnak egyfelől a nagy
méretű társas kapcsolati hálózatok további vizsgálataihoz,
másfelől az ilyen típusú hálózatok modellezéséhez,
elméleti leírásához.

Irodalom

1. Barabási A.-L.: *Behálózva*. Magyar Könyvklub, 2003.
2. J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, G. Szabó, M. A. de Menezes, K. Kaski, A.-L. Barabási, J. Kertész: Analysis of a large-scale weighted network of one-to-one human communication. *New Journal of Physics* 9 (2007) 179.
3. J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvönen, G. Szabó, D. Lazer, K. Kaski, J. Kertész, A.-L. Barabási: Structure and tie strengths in mobile communication networks. *PNAS* 104 (2007) 7332.
4. M. Granovetter: The strength of weak ties. *Am. J. Sociol.* 78 (1973) 1360.
5. G. Palla, A.-L. Barabási, T. Vicsek: Quantifying social group evolution. *Nature* 446 (2007) 664.

FRAGMENTÁCIÓS FOLYAMATOK UNIVERZALITÁSI OSZTÁLYAI

Kun Ferenc

Debreceni Egyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Meglepő univerzalitás

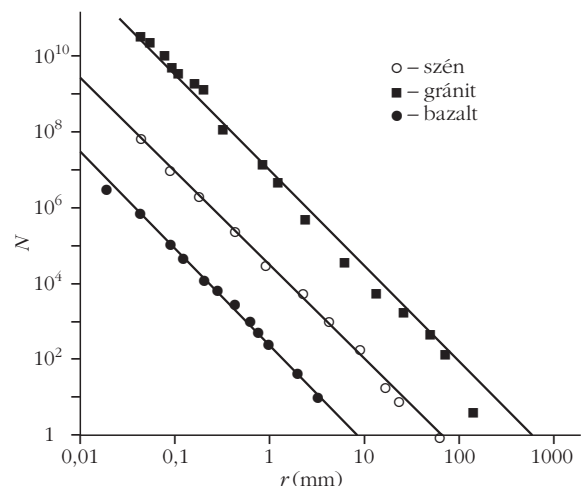
Hétköznapi tapasztalat, hogy ha elejtünk egy porcelántányért, az a konyha talajához csapódva darabokra törik. Általánosan igaz, hogy egy szilárd test széttörése, fragmentációja akkor következik be, ha a testtel rövid idő alatt nagy mennyiségű energiát közlünk. Ez elérhető például úgy, hogy a testre ütést mérünk egy kalapáccsal, lövedéket lövünk bele, robbanóanyaggal felrobbantjuk, vagy ha a testet ütköztetjük egy másikkal (például a talajjal). Az energiaközlés következtében egy lökéshullám jön létre, amely nagyszámú repedést hagy maga után, s e repedések mentén a test darabokra esik szét. Fragmentációs jelenségek a természetben igen széles méretskálán fordulnak elő: a Naprendszer aszteroidáinak ütközésétől a mikrovilág hosszú láncmolekuláinak töredezéséig mindenütt találkozhatunk velük. A közbenső méretskálán számos ipari alkalmazás (bányászat, nyersanyag-feldolgozás) és geológiai példa (vulkánkitörés) említhető.

Szilárd testek széttörése egy egyensúlytól távoli folyamat, amely rendkívül gyorsan játszódik le, így a fragmentációhoz vezető mikroszkopikus törési események kísérletileg nehezen hozzáférhetőek, a megfigyelések általában néhány mennyiségnek a folyamat végállapotában előálló eloszlásaira vonatkoznak. Már egy porcelántányér vagy egy üvegpohár elejtésekor is észrevehető, hogy a legtöbb darab kis méretű, s a méretük növekedésével a keletkezett fragmensek darabszáma csökken. Az elmúlt évtizedekben a laboratóriumi kísérletek arra a meglepő eredményre vezettek, hogy az egyes fragmensek méretének vagy tömegének gyakoriságát jellemző méreteloszlás, illetve tömegeloszlás hatványfüggvény szerint csökken, függetlenül az anyagi minőségtől, az energiabetáplálás módjától és a releváns mikroszkopikus kölcsönhatásoktól. Így például a nehéz atommagok ütközésekor keletkező kisebb atommagok töltéseloszlása ugyanúgy hatványfüggvény-viselkedést mutat, mint a

bányában robbantott széndarabok tömegének, vagy a Naprendszerben keringő, számos ütközést elszenvedett aszteroidák átmérőjének eloszlása [1].

Szilárd testek fragmentációjának beható vizsgálata további érdekes eredményekkel szolgált. Kimutatták, hogy a fragmensméret-eloszlás hatványfüggvényalakot vesz fel, ha a széttört test kellően rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságokkal rendelkezik (például beton, üveg, kerámia, gránit, bazalt, ...) és rideg törést mutat, azaz lineárisan rugalmasan viselkedik az eltörésig. Ilyenkor az eloszlás csökkenésének gyorsaságát jellemző τ hatványkitevő értékét elsősorban a test d dimenziója határozza meg, amelynek alapján a fragmentációs folyamatokat három univerzalitási osztályba lehet sorolni: egy dimenzióban, például vékony, hosszú üvegrudak törésekor, az exponens értékét

1. ábra. Fragmentációs folyamat során keletkezett darabok méretének eloszlása három különböző anyagra, amelyeket különböző módon törtek össze: egy bazaltkockába laboratóriumban lövedéket lőttek, a szén bányában robbantották, míg a gránit egy föld alatti atomrobbantásban lett szétzúzva [1]. A kétszer logaritmikus skálán kapott egyenesek hatványfüggvény-viselkedést jeleznek, amelyek kitevője (az egyenesek meredeksége) is közel azonos.



ke $\tau \approx 1,5$; a vékony üveglapok törésével megvalósítható kétdimenziós esetben a mérések $\tau \approx 1,5-2,0$ eredményre vezettek, míg háromdimenziós tömbi anyagok fragmentációjakor a mért exponens $\tau \approx 2,3-2,7$. A tömbi anyagok fragmenseinek méreteloszlására mutat példát az 1. ábra. A fragmentációs jelenségekre megfigyelt univerzalitás megértése, a lehetséges univerzalitási osztályok felderítése máig az elméleti kutatások fő hajtóereje [1, 2].

Szétrobbanó tartályok és az űrszemét

Tömbszerű, egy-, két-, vagy háromdimenziós szilárd testek mellett héjszerű struktúrákat is változatos formában használunk a mindennapi életben és az iparban. Tipikus héjszerű struktúrák a tartályok, nagynyomású kamrák, de a repülőgépek és űrállomásmodulok is héjszerű struktúrával rendelkeznek. Ilyen héjak dinamikus terheléssel, például robbanással szembeni stabilitása, illetve széttörésének dinamikája rendkívül fontos gyakorlati és elméleti probléma. Elméleti érdekességüket az adja, hogy lokális geometriai struktúrájuk kétdimenziós, de az anyag dinamikája három dimenzióban zajlik, ami speciális törési módusokhoz, s így a tömbanyagoktól eltérő fragmentációhoz vezethet. Ennek ellenére héjak fragmentációjára korábban nem készültek szisztematikus kísérleti és elméleti vizsgálatok.

Héjszerű struktúrák fragmentációja különösen fontos szerepet játszik napjaink űrkutatásában az űrszemét problémájának megoldása során. Ma már széles körben használnak Föld körül keringő műholdakat meteorológiai, telekommunikációs, navigációs és katonai célokra. Számuk évente száznál többel növekszik, s már meghaladja a hateret. Az elmúlt ötven év űrkutatása során azonban nagy számban halmozódott fel a világűrben haszontalan objektum, azaz szemét is, ami komoly veszélyt jelent a műholdakra, mert ütközéskor tönkretelheti őket. Az űrszemét fő forrását a föld körüli pályán történt fragmentációs események, zárt héjszerű objektumok felrobbanása jelenti. A műholdakat pályára állító rakéták lecsatoló üzemanyagtartályai akár évekig keringhetnek a Föld körül bennük némi maradék üzemanyaggal. Az idő múlásával ez az üzemanyag felrobbanhat s a keletkezett hatalmas számú törmelék felhőként kering a Föld körül, ahol megsemmisítheti az útjába eső hasznos objektumokat. A probléma komolyságát jelzi, hogy nemzetközi összefogással kiépült egy olyan radarrendszer, amelynek segítségével az összes 10 centiméternél nagyobb szemétdarabot követni lehet. A mérésekkel párhuzamosan számítógépes programokkal, szimulációkkal is követik a szemét mozgását, majd ennek megfelelően akár napi rendszerességgel módosítják a műholdak pályáját az ütközések elkerülése érdekében.¹ Az igazán komoly veszélyt tehát a néhány centiméteres és annál kisebb fragmensek jelentik,

mert ezek annyira kicsik, hogy sem radarral, sem optikai módszerekkel nem lehet őket követni, viszont mozgási energiájuk elég nagy lehet ahhoz, hogy műholdakat tegyenek tönkre. Ebben a mérettartományban – megfigyelések hiányában – az elméleti számításokra kell hagyatkoznunk.

Kísérletek héjszerű struktúrákkal

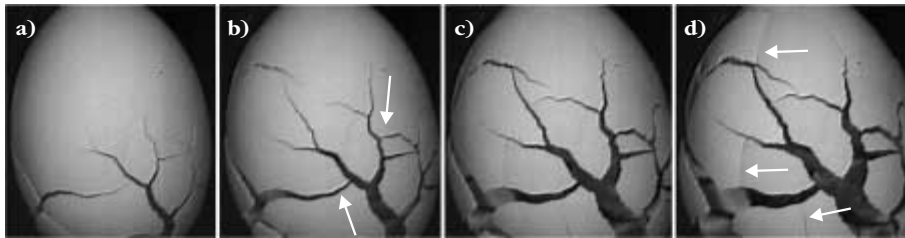
Héjszerű struktúrák széttörésének és az űrszemét problémájának megértéséhez a korábbiaknál részletesebb információra van szükségünk a fragmentációs folyamatokról. Ahhoz, hogy a törmelékdarabok föld körüli pályáját számolhassuk, megbecsülhessük a pálya várható élettartamát, illetve egy esetleges ütközés okozta károkat, ismernünk kell az egyes darabok tömegét, sebességét és alakját is.

Vizsgálataink első lépéseként laboratóriumi kísérleteket végeztünk zárt héjak széttörésére. Könnyen kezelhető, egyszerű héjakat keresve végül meglepő módon a tojás héj bizonyult az egyik legkiválóbb kísérleti alanyként. Mivel a tojás héj anyaga egy bioke-ramia, amely rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságokat mutat és ridegen törik, egyedülálló lehetőséget nyújt héjszerű struktúrák fragmentációjának tanulmányozására. A kísérletekhez a tojás tartalmát két szabályos lyukon keresztül kifűjtük, majd az üres héjat kimostuk és kiszárítottuk. Annak tisztázására, hogy a héjszerű struktúra anyagi tulajdonságai hogyan befolyásolják a fragmentációs folyamat eredményét, a kísérleteket elvégeztük több különböző típusú tojás héjjal (tyúk- és fürjtojással), továbbá műanyag- és üveggömbökkel is. A rideg törés biztosítására a műanyag-gömbhéjakat folyékony nitrogénben lehűtöttük.

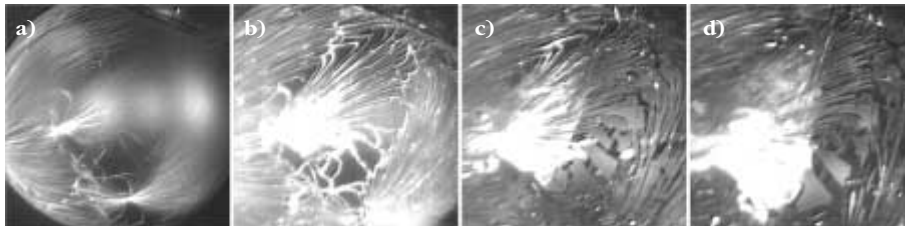
Az energia betáplálására két módszert alkalmaztunk: vizsgáltuk a héj ütközés és robbanás okozta fragmentációját. Az ütközéses kísérletekhez egy katalpultot építettünk, amellyel a héjakat a kemény talajba löktük. Robbantáshoz durranógázt használtunk, azaz a héjakat hidrogén és oxigén 2:1 arányú keverékkel töltöttük fel, majd távirányítással, elektromos gyújtással indítottuk a folyamatot. Mindkét fragmentációs folyamat egy nagyméretű, puhafalú műanyagzsákban zajlott, hogy minimalizáljuk a környezet zavaró hatását. Lehetőségünk nyílt a robbantási kísérleteket az Oslói Egyetem Fizikai Intézetének nagy sebességű jelenségekkel foglalkozó laboratóriumában is elvégezni, ahol speciális nagy sebességű kamerák segítségével sikerült a héjak széttörési folyamatáról mélyebb információt szereznünk.

A 2. ábrán a tojás héj robbantási folyamatáról készült pillanatfelvételek láthatók. A felvételek elemzésével arra a megállapításra jutottunk, hogy a héjak feltörésének dinamikája két jól elkülönülő lépésre bontható. Megfigyelhető, hogy a fragmentáció egy repedés megjelenésével indul a tojás laposabb oldalán, ahol a héj vékonyabb és gyengébb. A tojás héj tágulása miatt a héjfelületen jelentős húzófeszültség épred, amelynek eredményeként a repedés nagy sebességgel halad a

¹ A NASA Space Debris Department nyilvántartása szerint eddig a világűrben 178 darab robbanás történt, a folyamatosan követett törmelékdarabok száma közel 200 000.



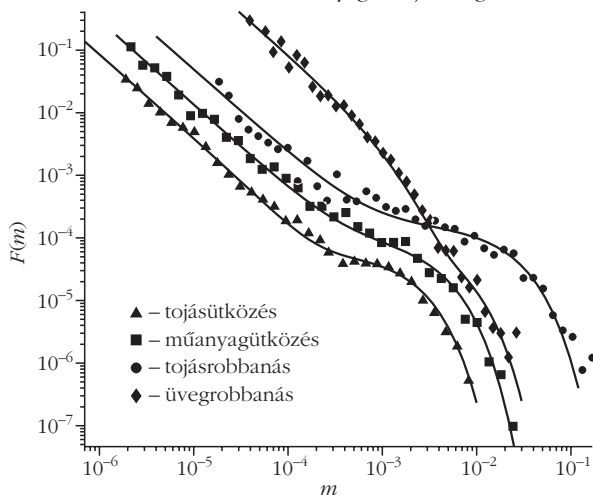
2. ábra. Pillanatfelvételek egy szétrobbanó tojáshéjról. A fragmenseket a hierarchikusan elágazó repedések ágainak összeolvadása hozza létre (a és b). A nagy fragmensek továbbdarabolódnak a hajlító feszültség hatására (c és d). A kamera sebessége 15 000 képkocka/másodperc, aminek alapján a repedés hegynének becsült sebessége 230–250 m/s.



3. ábra. Üveggömb szétrobbanása. A hosszú egyenes repedések anizotróp, tűszerű fragmenseket hoznak létre. A repedésterjedés becsült sebessége nagyobb, mint 2000 m/s.

képen felfelé. A héj anyagának rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságai és a viszonylag nagy sebesség miatt a repedés instabillá válik és elágazik, majd az így megnövekedett energiadisszipáció lelassítja és stabilizálja a repedés új ágait. A héj tágulása miatt aztán ezek a mellékágak növekvő sebességgel terjednek, ezért ismételt instabilitás és elágazás jöhet létre. Így tehát a tágulás okozta húzófeszültség eredményeként létrejövő *elsődleges* repedések egy hierarchikusan elágazó, faszzerű struktúrát hoznak létre. A fragmensek a repedési fa mellékágainak összeolvadásával jönnek létre, amire a 2.b ábrán a nyilak mutatnak példát. A fragmentációs folyamat második szakaszában már a hajlító feszültség játszik szerepet, amelynek hatására a héjdarabokban másodlagos repedések jönnek létre a korábbi elsődleges repedésekre merőlegesen (a 2.d ábrán a nyilak jelzik ezeket). Fontos megjegyezni, hogy a tojáshéjdarabok alakja jó közelítéssel izotróp, erősen elnyúlt fragmensalakot sosem figyeltünk meg. A tojáshéj frag-

4. ábra. A fragmensek $F(m)$ tömegeloszlása az ütközéses és robbantásos kísérletekben különböző anyagi tulajdonságok esetén.



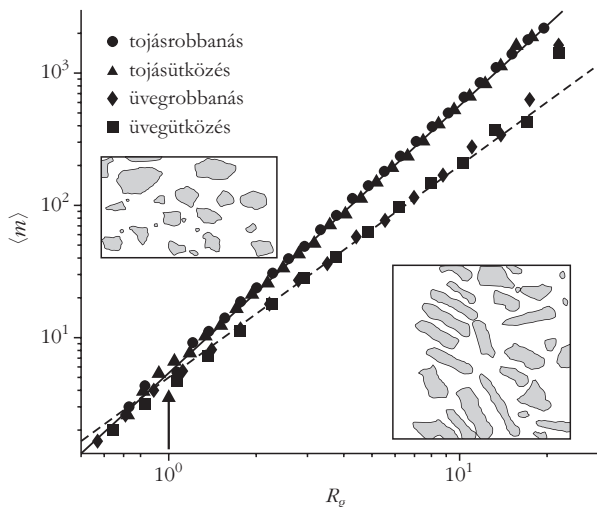
mentációjának fent bemutatott folyamata egy általános mechanizmus, amely erősen rendezetlen, rideg anyagok széles osztályára érvényes.

Üveggömbökkel végzett kísérleteink kimutatták, hogy az elsődleges repedések dinamikája erősen függ az anyagi tulajdonságoktól. Az üveg mechanikai teherbíró képessége és Young-modulusa sokkal nagyobb a tojáshéjénál, míg a mikroszkopikus rendezetlenség és a rugalmas hullámok csillapítása jelentősen kisebb. Ennek következményeként üvegben a repedések sokkal nagyobb sebességgel terjednek, és viszonylag nagy távolságot tudnak megtenni elágazás nélkül [3, 4]. Ahogy a 3. ábrán megfigyelhető, az üveggömb elsődleges repedései egyenesek, amelyek a héj véletlenszerűen elhelyezkedő leggyengébb pontjaiból indulnak ki. A repedések nem ágaznak el, így az elsődleges repedések nagy számú, vékony, hosszú, tűszerű fragmenst eredményeznek, amelyek instabilak a hajlítással szemben. A másodlagos repedések a tűszerű fragmenseket tovább darabolják.

Zárt héjak univerzalitási osztálya

A mérési adatok kvantitatív kiértékeléséhez a fragmenseket egy nyitott scannerrel digitalizáltuk, így minden egyes robbantási és ütközési kísérlet eredményét egy fekete-fehér képpé tudtuk alakítani. A képeken a fragmensek fekete foltként jelentek meg a fehér háttéren, amelyeket egy klaszterkereső programmal azonosítottunk. Az egyedi fragmenseket három mennyiséggel jellemeztük: a fragmens m tömegét a folt pixeleinek számával definiáltuk, a fragmens A felszíne a folt kontúrvalójának hossza, a R_g girációs sugarát (a fragmens átlagos sugarát) pedig a folt m pixeleinek r , helyvektorából számítottuk ki. A jó statisztika eléréséhez a kísérleteket azonos körülmények között nagy számú mintadarabbal megismételtük: összesen körülbelül 300 darab tojást, továbbá 200 darab műanyag- és üveggömböt használtunk fel. Az egyes mennyiségeknek a továbbiakban bemutatandó eloszlásfüggvényei 40–50 fragmentációs eseményre voltak átlagolva. Egy robbantási, illetve ütközési kísérletben tipikusan néhány száz, illetve néhány ezer fragmens keletkezik.

A 4. ábrán a fragmensek $F(m)$ tömegeloszlása látható különböző anyagból készült héjak esetén az ütközési és robbantási kísérletekben. A mérések egyik legfontosabb eredményeként azt kaptuk, hogy a kis fragmenstömegek tartományában az egyes eloszlások hatványfüggvény-viselkedést mutatnak, amelynek exponense hibahatáron belül megegyezik az egyes ese-



5. ábra. A fragmensek $\langle m \rangle$ átlagos tömege az R_g girációs sugár függvényeként. A belső ábrákon digitalizált tojáshéj (bal) és üveg (jobb) darabok láthatók, ahol a fragmensalakok izotróp-anizotróp jellege jól megfigyelhető.

tekben. Az eloszlásfüggvények között különbség csak a nagy fragmensek tartományán észlelhető. A függvényillesztések alapján a τ exponens értékére $\tau = 1,35 \pm 0,05$ adódott, függetlenül a héj anyagi minőségétől és az energia betáplálásának módjától. Összevetve az irodalomban található eredményekkel, a héjakat jellemző exponens szignifikánsan különbözik a két- és háromdimenziós tömbi anyagokra mért exponensektől, ami egyértelműen a zárt héjak speciális széttörési mechanizmusának következménye. Az exponens értéke alapján a zárt héjak széttörése a fragmentációs jelenségeknek egy újszerű univerzalitási osztályát adja [2–4].

Tömbi anyagok fragmentációs kísérletei során a fragmensek alakja mindig izotrópnak bizonyult, azaz sosem figyeltek meg elnyúlt, erősen anizotróp fragmensalakat. Héjak esetén viszont láttuk, hogy az anyagi minőségtől függően a héjfragmensek alakja az izotróptól az erősen anizotróp, tűszerű formáig változhat. Annak jellemzésére, hogyan változik a fragmensek alakja a méretükkel, meghatároztuk a fragmensek $\langle m \rangle$ átlagos tömegét az R_g girációs sugár függvényeként. Az 5. ábrán látható, hogy minden egyes héjtípus és energia-betáplálás esetén hatványfüggvényt kapunk eredményül, de az exponens értéke jelentősen függ az elsődleges repedésmintázat szerkezetétől. Mivel a tojáshéjdarabok viszonylag szabályos, izotróp alakúak, tömegük a girációs sugár második hatványával arányos, azaz $\alpha = 2,0 \pm 0,05$ értéket kaptunk illesztéssel. A nagyméretű üvegdarabokra szignifikánsan kisebb az exponens $\alpha = 1,5 \pm 0,08$, viszont a kisebb méretekhez közeledve üveg esetén is átmenetet kapunk az izotróp

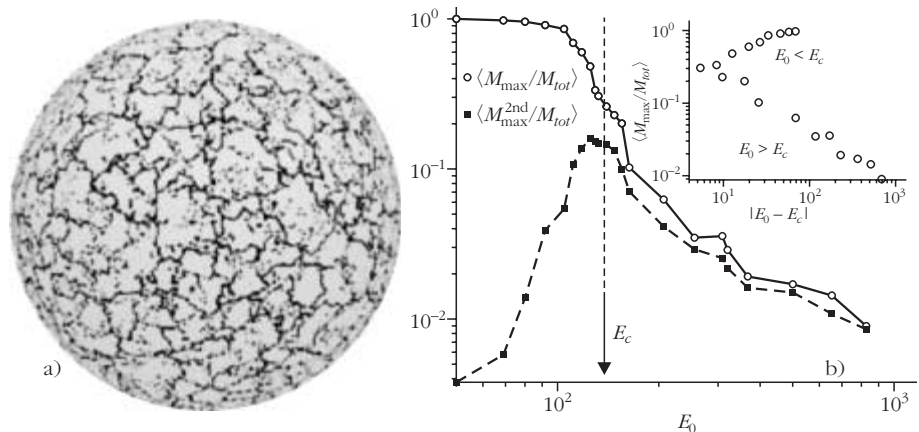
fragmensalakhoz $\alpha = 2,0 \pm 0,08$ kitevővel. Az átmeneti fragmensméretet az 5. ábrán a nyíl jelöli [4]. Az $\alpha < 2$ exponens azt jelzi, hogy az üvegfragmensek önaffin tulajdonságúak, azaz minél nagyobbak, annál elnyúltabbak. Hasonló önaffinitást tömbi anyag fragmenseire sosem figyeltek meg, ez a fragmentálódó héjszerkezetek törési mechanizmusainak következménye [4].

Számítógépes szimulációk

Héjszerkezetek fragmentációjának elméleti leírására kidolgoztunk egy realiztikus, háromdimenziós modellt, amelynek keretében molekuláris dinamikai szimulációkkal vizsgáltuk zárt héjak felrobbanását és kemény fallal történő ütközését. A modellben egy gömbhéjat diszkrétizáltunk – mezoszkopikus méretű elemekre bontottuk – úgy, hogy a gömb felszínét véletlenszerű háromszögekkel fedtük le. A háromszögek csúcspontjaiba tömeggel rendelkező részecskéket helyeztünk, amelyeket a háromszög élei mentén rud-elemekkel kapcsolunk össze. Egy robbanási folyamat szimulációja során a gömböt gázzal töltjük fel, amely a nyomástól függő erőt fejt ki a modell diszkrét elemeire. A rendszer időfejlődését a részecskék klasszikus mechanikai mozgásegyenleteinek numerikus megoldásával állítjuk elő. A fragmentációs folyamat során fellépő tágulás eredményeként a részecskéket összekötő rudak deformálódnak. Ha a deformáció a szimulációban átlép egy véletlenszerű küszöbértéket, a rúdelem eltörik, és egy repedés keletkezik a gömb felszínén. A 6.a ábrán egy robbantási folyamat szimulációjának eredménye látható, ahol a fekete pöttyök a mikrorepedéseket jelölik. A szétreplő darabokat visszahelyeztük eredeti helyükre, így a gömb felszínén jól megfigyelhetők a fragmensek.

Számítógépes szimulációkat végeztünk széles tartományon változtatva a robbanás kezdeti nyomását és az ütközés energiáját. A fragmentációs folyamat végállapotának jellemzéséhez meghatároztuk a legnagyobb és a második legnagyobb fragmens tömegét a kontrollpa-

6. ábra. a) Felrobbanó gömb szimulációjának végállapota. A szétreplő darabokat visszahelyeztük eredeti helyükre, így jól megfigyelhetők a repedések a felszínen. b) A legnagyobb $\langle M_{\max}/M_{\text{tot}} \rangle$ és a második legnagyobb fragmens $\langle M_{\text{max}}^{2\text{nd}}/M_{\text{tot}} \rangle$ átlagos tömege normálva a rendszer M_{tot} teljes tömegével. Belső ábra: a legnagyobb fragmens tömege az E_c kritikus ponttól mért távolság függvényeként.



raméter (nyomás, illetve betáplált energia) függvényeként. A 6.b ábrán jól látható, hogy amíg kicsi a betáplált energia, a legnagyobb fragmens tömege közel megegyezik a rendszer teljes tömegével, míg a második legnagyobb fragmens nagyságrendekkel kisebb. Ez azt jelenti, hogy alacsony energián a héj megrepedezik, a repedések mentén kiszáll némi por, de a rendszer megőrzi integritását. Ezen az energiatartományon tehát nem beszélhetünk fragmentációról, a héj csak károsodást szenved. A számítógépes szimulációk megmutatták, hogy a fragmentáció eléréséhez a betáplált E_0 energiának át kell lépnie egy E_c kritikus értéket, amikor a legnagyobb és második legnagyobb fragmens összemérhetővé válik, majd együtt csökken. A 6.b ábra belső kis ábráján a legnagyobb fragmens tömege látható az E_c kritikus ponttól mért távolság függvényeként. A kétszer logaritmikus skálán kapott jó minőségű egyenesek hatványfüggvény-viselkedésre utalnak. Ez azt jelzi, hogy az energia növelésével a károsodott fázisból a fragmentált fázisba történő átmenet a másodrendű fázisátalakulásokhoz hasonló módon következik be.

A fragmentált fázisban, azaz $E_0 > E_c$ esetén, a fragmensek tömegeloszlása a szimulációkban is hatványfüggvénynek adódik $\tau = 1,35 \pm 0,06$ exponenssel, ami nagyon jól egyezik a méréseinkkel [3, 4]. A szimuláció paramétereit egyetlen konkrét anyaghoz sem illesztettük, így a kísérletekkel való egyezés a héjszerkezetek univerzalitási osztályának robusztusságát is jelzi [3].

Analitikus számításokkal sikerült megmutatni, hogy az önaffin fragmensalak a hajlítási feszültség miatt fellépő másodlagos fragmentáció következménye. Így érthető, miért nem lehet önaffinitást tömbi anyagok fragmenseire megfigyelni [4].

Összefoglalás

A rendezetlen mikroszkopikus szerkezetű, ridegen törő szilárd testek fragmentációs folyamatai meglepő univerzalitást mutatnak: a keletkezett darabok méret-, illetve tömegeloszlása hatványfüggvény szerint csökken, amelynek exponense elsősorban a dimenziószámától függ. Vizsgálataink eredményeként kiderült, hogy a zárt héjszerkezetek fragmentációja során keletkező darabok tömegeloszlása és alakjellemezői is eltérnek a tömbi anyagokétól. Héjszerkezetek fragmentációja egy önálló univerzalitási osztályt alkot, ami a héj speciális törési mechanizmusainak következménye. A NASA és az Európai Űrhivatal (ESA) által a Föld körül keringő űrszemét követésére kifejlesztett szimulációs programok nem modellezik a szemetet keltő robbanási folyamatot, csak a törmelékfelhő időfejlődését határozzák meg. A szimulációs programokba tehát be kell táplálni a fragmentációs folyamat eredményét, azaz a fragmensek tömegét, méretét, alakját és sebességét jellemző valószínűségeloszlásokat. A bemutatott eredményeket űrszemét-szimulációs programokba beépítve növelhető az űreszközök biztonsága [5].

Irodalom

1. D. L. Turcotte: *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press, 1997.
2. F. Kun, H. J. Herrmann, *Physical Review E* 59 (1999) 2623.
3. F. K. Wittel, F. Kun, H. J. Herrmann, B.-H. Kröplin, *Physical Review Letters* 93 (2004) 035504.
4. F. Kun, F. K. Wittel, H. J. Herrmann, B.-H. Kröplin, K.-J. Maloy, *Physical Review Letters* 96 (2006) 025504.
5. J. Hogan: Exploding eggshells could reduce space junk risk. *New Scientist* (2004) 2456.

TARNÓCZI TIVADAR

1929–2007

Az MTA SZFKI Fémkutatási Osztály nyugalmazott tudományos főmunkatársa, *Tarnóczyi Tivadar* 2007. december 9-én, életének 79. évében elhunyt.

Tarnóczyi Tivadar az Eötvös Egyetemen szerzett fizikus diplomát 1955-ben. Egyetemi tanulmányait kezdetben egy évig az ELTE-n végezte, majd utána négy évig Európa egyik legismertebb és talán legjobb mágneses iskolájában, az Ural hegységben fekvő Szverdlovszkban (1991 óta újra: Jekatyerinburg) folytatta *Vonszovszkij* professzor mellett. Az ott szerzett ismer-



retei, és idehaza a KFKI-ban az 1950-es évek közepén indult mágneses kutatások szerencsés egybeesése tette lehetővé, hogy a frissen létrehozott Ferromágneses Osztályon *Pál Lénárd* irányításával készíthette el diplomamunkáját és kezdhette el kutatói pályafutását. Ehhez azonban arra volt szükség, hogy megteremtse a modern mágneses kutatások kultúráját, kidolgozza a klasszikus mágneses mérések módszereit, és megépítse kísérleti berendezéseit.

Csak ezek birtokában foghatott hozzá azokhoz a vizsgálatokhoz, amelyek a ferromágneses anyagok atomjai közötti kicserélődési kölcsönhatások természetének megismerésére, mindenekelőtt a mágneses anizotrópiára vonatkoztak. Jelentős eredményeket ért el, amikor a fenti jelenségeket az atomi rendeződést mutató rendszerekben, például vas–alumínium ötvö-

zetekben kezdte el vizsgálni. E témakörben elért eredményeit számos hazai és külföldi folyóiratban ismertette, és ezeket tartalmazza 1968-ban megvédett kandidátusi disszertációja. Ebben az időszakban lehetősége volt egy évet eltölteni a grenoble-i mágneses laboratóriumban, illetve részt vett a KFKI-ban a Mn-alapú ötvözeteken folyó kutatásokban is. Ezen a területen szintén számos publikáció társszerzője lett, amely munkákra a spintronikai kutatások megindulásával az 1990-es évek közepétől mind a mai napig igen sokat hivatkoznak a szakirodalomban.

Az atomi rendeződést mutató ötvözetek vizsgálatától egyenes út vezetett az ezekkel ellentétes tulajdonságú anyagokhoz, az amorf ferromágnesekhez, amelyekben tökéletes a rendezetlenség, beleértve a kristálytani rend hiányát is. Kiemelkedő eredményt jelentett ezen a területen a különleges mágneses szerkezettel rendelkező, buborékdomének létrehozására alkalmas amorf mágneses vékonyrétegekben (pl. Co-Gd) a doménfal mozgásának megfigyelésére alkalmas, merőben új módszer általa történt kidolgozása, amelyet továbbfejlesztve számos helyen használtak.

Hasonlóképpen nemzetközileg elismert eredményekre vezettek a ferromágneses fémüvegek előállításai és mágneses paraméterei közötti kapcsolatokra vonatkozó vizsgálatai. Az 1980-as évek közepétől kezdve a fémüvegek szerkezeti relaxációjának Curie-pont mérésen keresztül történő vizsgálatában végzett úttörő munkát. A nyugdíjba vonulása előtti években részt vett a nanokristályos anyagok és multirétegek mágneses tulajdonságainak felderítésében is.

Több mint négy évtizedes kutatói pályafutása alatt 55 angol nyelvű közleménye jelent meg, ezekből több mint 40 nemzetközi folyóiratban, és munkáira közel félezer hivatkozás történt a szakirodalomban.

Tarnóczy Tivadar kutatási tevékenységét röviden két dologgal lehet jellemezni. Az egyik a rendkívüli gondossága és precizitása a módszerek kidolgozásában, a kísérletek végrehajtásában és a mérési eredmények kiértékelésében, majd a következtetések levonásában. A másik a végtelen szerénysége, a tudományok iránti alázata, ami mindenkire kiterjedő segítőkészségével és határtalan nyugalomával párosult.

Nagy Imre

A FIZIKA TANÍTÁSA

KUGLER SÁNDORNÉ 100. SZÜLETÉSNAJÁRA

Sok ezernyi egykori tanítványa nevében szeretettel és tisztelettel köszöntjük *Kugler Sándorné Kovács Györgyi* tanárnőt századik születésnapja alkalmából.

Bizonyára sokan nem ismerik őt személyesen, de az szinte elképzelhetetlen, hogy közvetve ne tanultak volna ők is Györgyi nénitől. Az idősebbek az általa (férjével közösen) összeállított, először 1962-ben megjelent *Fizikai képletek és táblázatok* könyv szerzőjeként ismerhetik, az ifjabb generációk pedig a középiskolai függvénytáblázatok fizikai részének összeállítójaként. A függvénytáblázat címe az 1967-es első kiadás óta többször módosult, de Kugler Sándorné változatlanul a szerzők között szerepel, és azóta is tevékenyen részt vesz az időnként elkerülhetetlen átdolgozásban. Így aki az utóbbi négy évtizedben járt középiskolába, annak számára a fizika elsajátításához Györgyi néni is feltétlenül hozzájárult.

Sohasem volt annyira reflektorfényben, mint pályatársai közül a vele szinte egyidős *Vermes Miklós* (1905–1990) és *Kunfalvi Rezső* (1905–1998), vagy a rádiós és televíziós szereplései hatására országosan ismert *Öveges József* (1895–1979), de tevékenysége, eredményessége az övékével összemérhető.

A Pázmány Péter Tudományegyetemen matematikát, fizikát és kémiát tanult, és 1931-ben kapott diplo-

mát. Kémiát és matematikát csak rövid ideig tanított. Életét a fizika tanításának szentelte (és a családjának: négy gyermeket nevelt fel). 1931-től három évtizeden át Nagykanizsán volt gimnáziumi tanár. Tevékenységére felfigyelve 1961-ben Budapestre hívták vezetőtanárnak az ELTE Radnóti Miklós Gyakorlóiskolájába. Nagykanizsai és budapesti gimnazisták mellett így az ELTE TTK tanár szakos hallgatói közül tanárjelöltként sokan megismerhették pedagógiai módszereit.

Egykori tanítványai közül ma három fizikus akadémikus, jóval tíz fölötti az akadémiai doktorok és kandidátusok, egyetemi, főiskolai professzorok száma. (Nem mind fizikus, van közöttük közgazdász, mérnök, matematikus stb.) Oktatói-nevelői tevékenységét, a fizika tudásának és szeretetének átplántálását azonban nem igazán szerencsés számszerűsítve, afféle impakt faktórral mérni. Azt a legjobban azoknak az egykori tanítványainak a visszaemlékezései tükrözik, akikből nem fizikus vagy fizikatanár lett, hanem az élet bármely más területén állták meg a helyüket. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 1974-ben Mikola Sándor-díjjal ismerte el a fizika oktatásában végzett tevékenységét.

Szokatlan, de örömteli feladat elé állított bennünket az élet, amikor a szakcikk írásához szokott fizikusokként, tanárokként, mérnökökként próbáltuk megfogalmazni, hogy – tanítványként, tanárjelöltként,

Összeállította Szabados László.

kollégaként közlőről ismerve Györgyi nénit – mit is köszönhetünk neki, és egyáltalán mire emlékszünk vissza szívesen Vele kapcsolatban. Mindezt *Kovács László*, a szombathelyi főiskola fizikaprofesszora kezdeményezésére tettük, aki kötetbe foglalta ezeket a visszaemlékezéseket, köszöntéseket, hogy születésnapra meglepetésként Györgyi néninek ajándékozva majd Ő maga is felidézhesse tanári pályájának számtalan szép pillanatát. Az alábbiakban e személyes visszaemlékezések közül néhány szemelvényt bocsátunk közre. A *Fizikai Szemle* ezzel köszönti Györgyi nénit, és olvasói nevében jó egészséget, további tartalmas éveket kíván neki.

„TTK-s hallgatóként végeztem a tanítási gyakorlatot a Radnótiiban. Elég rövid volt ez az időszak, de ezalatt is kiderült számomra Györgyi néni nagy tudása, alapos felkészültsége, példamutató tanári magatartása. Megtanultam tőle a tapintatot, a türelmet, a segítőkészséget, a gyerek emberkénti kezelését, a fizika szeretetét, az önálló gondolkodásra nevelést.”

Sebők Tiborné Reményi Magdolna

„Az Ő hatására kezdtem el én is gyűjteni a fizikai feladatokat, rendszeresen »traktáltam« velük tanítványaimat. Györgyi néni nemcsak »elméleti« fizikát tanított, hanem lehetővé tette a fizika mindennapi életben való alkalmazásának megismerését.”

Kúti László

„Az volt a nagyszerű Györgyi néni tanításában, hogy teljesen biztos, alkalmazható alapokat adott. Az egyetemi évek alatt felmerült, magyarázatra váró elméleti és gyakorlati problémákra középiskolás tudásom és szemléletem alapján csaknem minden esetben mertem, tudtam elfogadható megoldást adni.”

Kovács László

„Az órára való felkészüléskor Györgyi nénivel a legapróbb részletig mindent megbeszélhettünk az elmélettől kezdve a feladatokon át, a kísérleteket pedig kipróbáltuk. Az első órákon Györgyi néni teljes figyelme a miénk volt. A felkészülésünket végigkísérte. De ha azt tapasztalta, hogy az órán rendben mennek a dolgok, akkor az egyik hátsó padban gyártotta a feladatokat a fizika tagozatos tanulóknak. Határtalan szorgalommal, végtelen kitartással, lelkesedéssel. És ha bementünk egy-egy ilyen órájára, elhűlve tapasztaltuk, hogy mi mindent tudnak ezek a diákok. Bizony nem mertünk volna versenyre kelni velük. Nagykanizsára kerülve tanárként sokszor elmentem olyan tabló alatt, amelyen ott volt Györgyi néni képe. Addigra már megtudtam néhány kollégától, hogy bizony sokan féltek annak idején a fizikától és tartottak annak tanárától. Én olyankor mindig mosolyogtam magamban: milyen jó, hogy amikor Györgyi nénit kértem vezető tanáromnak, nem ismertem a hírt szigorúságáról. Én csak a melegszívű, segítőkész, lelkiismeretes tanárral találkoztam. Biztatást kaptam tőle akkor, amikor még ki sem érdemeltem. Neki is köszönhetem, hogy soha nem fordult meg a fejemben, hogy mást is csinálhatnék a tanításon kívül.”

Martonné Németh Mária

„Nagy szerencsémnek mondhatom, hogy kezdő tanár koromban Györgyi néni, Ila néni (*Huszka Ernőné*) és Lenke néni (*Kiss Barnabásné*) kollégája lehettem a múlt század '50-es éveinek végén, a '60-as éveinek elején. Tőlük tanultam, hogy a tanár magabiztosságát a tanulók előtt szakmai felkészültségének minősége alapozza meg. Azt is tőlük tanultam, hogy a fizika tanításához a szemléltetés természetesen tartozik hozzá. 45–50 év távlatából ma már nem tudom, hogy pontosan melyik kísérlet elvégzésének módját melyiktől tanultam, nagyszerű továbbképzést jelentett akkoriban a Radnótiiban eltöltött minden nap. Azt azonban biztosan tudom, hogy az MKSA mértékrendszerre való áttérés módját Györgyi nénitől tanultam. Györgyi néni több előadást tartott nekünk az iskolában, amelyeken elmagyarázta a mértékegységeknek a tudományban és a tanításban betöltött szerepét. És éppen a '60-as évek elején tért át a hivatalos tudományos élet a CGS mértékegységrendszerrel az MKSA rendszerre. Tehát átíródtak a tankönyvek és a Györgyi néni által szerkesztett függvénytáblázat képletei is. Hogy Györgyi néni kitől, hogyan tanulta meg legelőször, nem tudom. Akkor ez nem érdekelt, mert természetesen tartottam, hogy Ő tudja, mint más módszertani újdonságokat is.”

Csákány Antalné

„1972-ben lettem az ELTE Radnóti Miklós Gyakorlóiskola fizikatanára. A szertár nyüzsgő, sietős, kicsit mindig zaklatott világában Györgyi néni magabiztos, derűt sugárzó lényé nagy érték volt. Úgy emlékszem, hogy közvetlenül sosem irányított bennünket, nem szervezte dolgunkat. Pontos, precíz munkájával mutatott példát nekünk, az akkor kezdő kollégáknak.”

Zanati Béla

„Csendes, finom modorával és precizitást árasztó egyéniségével vonzotta magához diákjait, akik fogékonyak voltak a technika és a fizika világa iránt. Fizikaórái és szakköri foglalkozásai egyre erőteljesebben hatottak sokunkra a továbbtanulás irányának megválasztásában is.”

Horváth Miklós

„Györgyi néni kiváló pedagógiai módszereinek köszönhetően egyértelműen a fizika lett a kedvenc tantárgyam, és érdeklődésem általában is a természettudományok felé fordult. Máiig nem felejttem az élményszámba menő, igen jól szemléltető kísérleteket, amelyeket látva szó szerint gyerekjáték volt megérteni és elsajátítani a fizika törvényszerűségeit. Külön öröm volt számomra, és igen nagy megtisztelésnek vettem, hogy szakkörösként órán kívül is tevékenykedhettem Györgyi néni »boszorkánykonyhájában«, a fizikaszertárban, és irányításával részt vehettem a következő óra kísérleteinek előkészítésében.”

Horváth István

„Keze ügyében volt mindig egy fizikai példatár (saját gyűjtemény), amelyből osztogatott is feladatokat rendszeresen naponta. Egyszerűen azt sugallta: fiam, ebben a füzetben van a jövőd záloga. Saját érdekedben – ha akarsz valamire jutni – dolgozzál. Én mindent megadok, amire szükséged lehet a felvételi vizsgán.”

Gaál Endre

„Nekem nem Györgyi néni tanította a fizikát. Mindig irigyeltem tanítványait, hiszen (az akkor igen gyakran használt) négyjegyű függvényábrájában a szerzők között olvastam a nevét. De megjött a lehetőség: Györgyi néni fizikasakkörére iratkozhattam be. Nagy élmény volt. Igazán akkor vált izgalmassá, mikor a feltett kérdéseimre nekem kellett megadnom a választ, Györgyi néni »csak« rávezetett. Mikor ahhoz a problémához értem, miért megy a cukor a teában középre, amikor annak a keverés hatására a szélére kellene mennie, Györgyi néni engedélyt adott, hogy egy társammal kísérleteket végezzek a kérdés megválaszolására. Nagy tisztességnek tartottam, és a legnagyobb izgalommal ismertem meg a Coriolis-erő rejtelmét, a hurrikán kialakulását egy pohár teában. (Ez az élmény még akkor is kísért, amikor sok évvel később az egyetemen meteorológus-hallgatókat tanítottam fizikára...) Mikor már Györgyi néni elismerte komolyságomat, Ő adott feladatot: ki kellett mérnem (ismét valakivel) a tehetetlenségi nyomaték alakfüggését. Fantasztikus munka volt. Boldog voltam, lelkesedtem. Fizikus lettem.”

Szász András

„Szeretve tisztelt osztályfőnökünk, Györgyi néni a fizika tudományára okított bennünket. Megtanított a logikus, dialektikus gondolkodás titkaira. A számok világának és törvényeinek alkalmazására és tiszteletére. Akik az általa vezetett fizikasakkör tagjai lehettünk, a kísérletek végzésekor maradandó, hasznos élményeket szerezhettünk. Egyetemi tanulmányaim során érezhettem főleg mindezek hasznát, majd később orvosi szakmám gyakorlásakor is. A fülészet és az audiológia a fő szakterületem. A hallás élettana a fizika törvényeire épül. A Györgyi néni által megalapozott tudást nap mint nap hasznosíthatom munkavégzésem kapcsán.”

Beke Árpád

„Györgyi néni igyekezete velem szemben sem volt hiábavaló. Én katonai főiskolára jelentkeztem, és a felvételi vizsgán a velem együtt felvételiző körülbelül 150 diák között matematikából és fizikából is az első tíz között végeztem. Ez persze lehet egyfajta minősítése az oda jelentkezetteknek is, én mégis itt éreztem először, hogy azért nem volt mindegy, ki tanította nekünk a matematikát, illetve a fizikát.”

Várkonyi Gábor

„A mai napig legfontosabbnak és legértékesebbnek azokat a középiskolai éveket és ezekben azokat az órákat tartom magam számára, amelyek elindítottak az akkor még – néha még most is – ismeretlen életállomások felé, amelyeket elértem, megéltem és talán még meg fogok élni. Ha meg kell nevezni a szüleimen kívül

a számomra emberileg és szakmailag leginkább mérvadó, meghatározó embereket, akiktől tanultam, akikre felnéztem, akiket tisztelhetek, akkor Györgyi néni a dobogón nagyon magasan áll.”

Vadász István

„Személyes tanítványaimmal dolgozva önkéntelenül is az ő módszerét kezdtem követni. Egyenrangú kollegialitást sugallok, minden döntési helyzetet igyekszem úgy csavarni, hogy kimenetét önálló választásként éljem meg. Aztán izgulok, hogy azt választják-e, amit helyesnek látok, netán más témájához pártolnak-e át, visszatérnek-e a tanszékre hosszabb külföldi tanulmányutakról. Biztosan tudom, hogy Györgyi néni ugyanezeket az ingadozó érzéseket élhette át, amikor a befolyásolás látszatát is messze elkerülve felébresztette bennünk az önállóan elért eredmények örömeinek érzését, és bízott a fizika megszeretéséig továbbhajtó erejünkben.”

Patkós András



„A feladatmegoldásokon túl érdekes kiegészítő témák szerepeltek a szakkörön. Györgyi nénit minden érdekelt, ami a fizikával kapcsolatos volt, és tudását nagy átéléssel, logikusan adta át nekünk. Külön megemlítem Györgyi néni mesteri modellező képességét, ahogyan a fizikai problémát matematikai feladattá alakította. Matematikus-közgazdászként modellezéssel foglalkozom, tanárként modellezést tanítok, és a motiválásban és a modellezésben Györgyi nénit igyekszem utánozni azóta is.”

Simonovits András

„Rávezetett, hogyan lehet felismerni egy probléma típusát, megtanított arra, hogyan és hol nézzünk utána hasonló, már megoldott feladatoknak, hogyan lehet adaptálni egy hasonló probléma megoldásának tapasztalatát egy új feladathoz. Végül, jól megválogatott mintafeladatokon keresztül megtanított minket problémát megoldani, fizikus fejjel gondolkodni. Talán ez volt az, ami korábban valamennyi tanárom repertoárjából hiányzott. A bevett séma szerint *tanár* felírta a feladatot, *jótanuló* kiment a táblához, melléírta a megoldást, de soha senki nem mondta el a többieknek, az adott esetben miért pont így volt célszerű a megoldást keresni.”

Darvas György

„Bár nem rajongtam a fizikáért, boldogultam vele. Bevallom, többször félve vonultam az előadóterem felé. Vártuk Györgyi nénit, aki a nagy, fekete könyvével, példatárával – mely tele volt feladatokkal – megjelenjen és bennünket »gyötörjön«! Számptalan példát oldottunk meg a tanultak alkalmazásával. Főleg induláskor én csak segítséggel találtam az odaillő képleteket. Szeren-

csére Györgyi néni néhány ráhangoló kérdéssel megnyitotta a megoldás útját. Kiegyensúlyozottsága, nyugalma jó hatással volt rám. Ez áradt belőle nemcsak az órákon, de akkor is, amikor kulturális rendezvényekre, majd a végső búcsúra, a ballagásra készült az osztály. A szeretetteljes szigor mellett szeme sarkában én mindig látni véltem egy »fényugarat«, amely nekem »bátorságot«, egy kis önbizalmat adott. Munkájának igazi értékét nem 18 évesen, hanem csak később ismertem fel.”

Sütő Istvánné Bodó Piroska

„Emlékeim alapján azt mondhatom, hogy Öveges Józsefhez tudlak hasonlítani. Tanításod tartalmát és hatását testvéreimen tudom igazán lemérni: Mária és Ágnes el voltak Tőled ragadtatva, egészen biztos, hogy a Te példád alapján, hatásodra lettek matematika-fizika szakos tanárok.”

Kerecsényi Erzsébet

„Tőle nem csak a fizika tudományának rejtjelmeit tanultuk meg, tanultunk pontosságot, igényességet, a tudás iránt vágyat, annak fontosságát. Személyes példája elkísér bennünket egész életünkben. Ő táplálta belénk a kitűzött célok eléréséhez szükséges akarni vágyást. Talán ennek is köszönhető, hogy mind a harmincan megálltuk a helyünket az életben. Hisz kaptunk olyan útravalót az Ő személyes varázsa révén, amely, velem együtt, hét osztálytársamat vezért a pedagógus pályára. S egész eddigi életünkben hűségesek maradtunk hivatásunkhoz.”

Miklós Zoltánné Vargha Ildikó

„A Györgyi néni-jelenséghez hozzátartozott a szemüveg és a mögüle kitekintő mélység, odafordulás, a közeledő arcot és szót élővé avató fénye a szemnek. Mennyi szellemi, érzelmi és fizikai erőt, milyen mély bölcsességet képes őrizni és továbbadni egy négy gyermekes tudós édesanya! – ennek az igazságnak felismeréséhez csak későbbi, érettebb korunkban jutottunk el... Fizikatanárunk azon kevés pedagógus közé tartozott, aki a diákot elfogadó szívnyugalomból soha ki nem lendült, s láthatóan saját örömeiként is mutatta be a kísérleteket, higadtan, visszafogott lelkesedéssel magyarázott mindig többet és mindig mélyebben a tankönyvben leírtaknál.”

Varga Lászlóné Geresits Gizella

„Kuglerné Tanárnőnek volt egy nagy trükkje: Mindig olyan példákat oldottunk meg a szakkörön, amelyek így vagy úgy, de hajztak az éppen aktuális, havi Matlapok (mi még így hívtuk) fizika rovatában megjelent feladatokra. Pontosabban, nem mindig! Csak eleinte... 2–3 hónapig. Amíg rákaptunk a feladatmegoldás, a kíváncsiság kielégítődése, a kihívás okozta öröm ízére. Mi vártuk volna utána is a segítséget, a hasonló feladatok során alkalmazandó trükkök ismertetését, de ez fokozatosan elmaradt, és végül magunkra lettünk utalva. Emlékszem, már akkor, gimnazista fejjel is, nagyszerű pedagógiai elgondolásnak tartottam ezt a módszert, és már akkor is szeretettel gondoltam a Tanárnőre, hogy így vezetett rá valamire, amit az életem fontos és sok örömet jelentő részévé vált, és amibe a kezdeti segítség nélkül nem vágtam volna bele.”

Vicsék Tamás

A MESEBELI ÉGIG ÉRŐ PASZULY: AZ ŰRKÁBELEN SUHANÓ ŰRLIFT

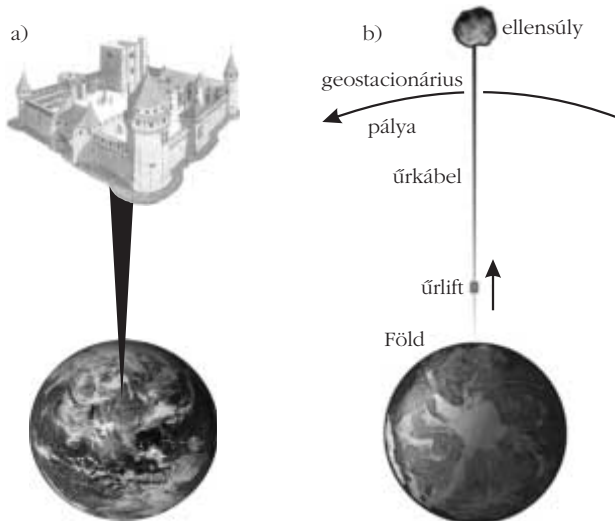
Horváth Gábor
ELTE, Biológiai Fizika Tanszék

Az űrlift futurista víziója

A csillagászokat és űrkutatókat állandóan foglalkoztató kérdés, hogy miként lehetne még könnyebben és olcsóbban eljutni a világűrbe. A rakéták űrkutatásbeli alkalmazását az elsők között *Konstantyin Eduardovics Ciolkovszkij* (1857–1935) orosz fizikus szorgalmazta. Ő vetette föl 1895-ben először egy „égi kastély”, mai szóhasználattal egy űrállomás megépítését, amit egy magas földi toronyhoz kapcsoltak volna egy erős kábellel (*1.a ábra*). Eme „űrkábelén” egy „űrlift” szállította volna az embereket, űreszközöket és alapanyagokat a Föld és a magasban lebegő űrállomás között (*1.b ábra*). Az űrlift első korszerű elképzelése 1960-ból *Jurij Arsutanov* leningrádi mérnöktől származik, amely ötlet azonban visszhang nélkül maradt. Az űrfölvonó ötlete a 20. századi tudományos-fantasztikus irodalomban is föl-fölbukkant, mint például *Arthur Charles Clarke* (1917–2008) angol író és mérnök *Az éden szökőkútjai*

(*The Fountains of Paradise*, 1979; magyarul, Budapest: 1993) és a *3001 – Végső űrodüsszea* (3001 – *The Final Odyssey*, 1997; magyarul, Budapest: 1999) című regényeiben. Az utóbbi könyv történetében az emberek jelentős része a Föld köré épült, összefüggő geostacionárius gyűrűben él, amit több ponton űrkábelek kötnek össze a Föld különböző pontjaival.

Az űrlift tervezésével régóta foglalkoznak már a csillagászok, űrkutatók és űrmérnökök [1–4], mivel egy ilyen űrfölvonó megépítése akár 10 000-ed részére is csökkenthetné a világűrbe jutás költségeit. A kábelt a Földön egy közel 50 km-es toronyhoz kötnék, valahol az Egyenlítő mentén. Így a kábel alsó része mindig éppen a geostacionárius pályán keringő tömegközéppont alatt maradna, másrészt pedig az egyenlítői elhelyezés azért is előnyös, mert a hurrikánok és erős szélleköcsök, amelyek egy ilyen magas torony alsóbb szintjeit veszélyeztethetnék, elkerülnek. Föül a kábel a geostacionárius pályán túl keringő, jókora ellensúlyhoz lenne rögzítve



1. ábra. Ciolkovszkij képzeletbeli égi kastélya (a) és az űrkábel-űrlift koncepciójának vázlatja (b).

(1.b ábra). Így a kábel megfeszülne a Föld forgása miatti centrifugális erő következtében. A kifeszülő űrkábel „vágányok” lennének, amelyeken járművek szállítanák az utasokat, a víz-, élelem-, illetve energiautánpótlást. A fölfelé vezető úton megállókat lehetne elhelyezni, ahonnan pályára állíthatók lennének a különböző űreszközök.

Az angolul *skyhook*nak, azaz égi kampónak, horognak, kapocsnak is nevezett űrlift-űrkábel két alapvető részből áll: a fölvonófülkéből és a Föld Egyenlítője fölött közel 36 000 km magasságban húzódó geostacionárius körpályán túlnyúló kábelből. Az űrlift megvalósításával elkezdődhetne az ég kolonizációja, gyárak és telepek létesülhetnének a fejünk fölött, több tízezer kilométer magasban.

Míndez elsőre komolytalanul hangzik, hiszen egy több mint 36 000 km hosszú kábel előállításához még akkor is rengeteg anyag kell, ha az csak néhány cm vastagságú, és nem is készülhet akármiből. A kábelnek mindenekelőtt el kell bírnia a saját súlyát. Például egy állandó keresztmetszetű acélkötelet csak akkor lógathatnánk le a magasból anélkül, hogy saját súlya elszakítaná, ha a hosszúsága nem lenne nagyobb, mint $h = 20$ km [4]. Ahhoz, hogy egy 1 g/cm^3 sűrűségű kötelet lelógathassunk 36 000 km magasból, az anyag T^* szakítószilárdságának $6,25 \cdot 10^{10}$ Pa nagyságúnak kellene lennie, ami közel százszorosa az acélénak [4]. Az űrkábel tömegét csökkenthetjük, ha a vastagságát a magasság függvényében optimalizáljuk. A Földtől fölfelé ugyanis egyre nőnek az anyagban föllépő húzófeszültségek, egészen a geostacionárius pályáig, ahol az űrkábel vastagságának maximálisnak kell lennie. Az űrlift optimalizált alakú kábele tehát a geostacionárius pályán „kihasadós” (maximális), a Földhöz rögzített végén pedig minimális átmérőjű. Ha acélból építkeznénk, akkor a kábel maximális átmérőjének több milliószor nagyobbak kellene lennie, mint a Föld felszínén. Az ilyen kábel méretei már összemérhetőek lennének a Föld nagyobb hegyláncaival. Gyémánt alkalmazásával a kábel maximális és minimális

vastagságának Q aránya csak 21,9 lenne, viszont a gyémánt nagyon törekeny és drága. A zylon nevű polimerszál esetében $Q = 710$, a szén nanocsőből készült kábel viszont alig hasadna ki, mert $Q = 1,7$ [4].

Az űrlift-űrkábel megtervezéséhez a nanotechnológia vihet közelebb [4]. 1991-ben fedezték föl a fullerén molekula előállításakor keletkező mellékterméket, a szén nanocsöveket. E nanoméretű, lyukas hengerek tulajdonképpen föltekeredett szénatomhálók-ból állnak. A szénnek ez a módosulata rendkívüli elektromos és mechanikai tulajdonságokkal bír. Az űrlift szempontjából az a leglényegesebb, hogy a szén nanocsövek szakítószilárdsága meghaladja a gyémántét is, nagyságát $T^* = 1,3 \cdot 10^{11}$ Pa-ra becsülik. Ahhoz azonban, hogy a nanocsöveket az űrkábel létrehozásához szükséges nagyon erős kompozitanyag előállításához lehessen fölhasználni, legalább néhány mm-re kellene növeszteni a hosszukat. Nagy erőfeszítéseket tesznek a hosszabb szén nanocsövek előállítása érdekében. A szén nanocsövekből előállítandó, 36 000 km-nél hosszabb űrkábel nagy kihívás a tudomány számára.

A mesebeli égig érő paszuly

Szinte minden nemzet mese- és mondavilágában előfordulnak égig érő növények, amelyeken fölmászva a mese/mondahősök különféle csodákkal teli égi világba juthatnak. A magyar kultúrkörben e témában megemlíthető például *Benedek Elek* (1859–1929) *Az égig érő fa* című meséje, *Jankovics Marcell* (1941–) rajzfilmrendező *Az égig érő paszuly* című mesefilmje, vagy *Janikovszky Éva* (1926–2003) *Az égig érő fű* című, 1979-ben forgatott ifjúsági filmje. Az égig érő növény egy olyan meselem, amely többnyire kezdő motívum, ritkábban keretmese [5, 6]. Habár ilyen égig érő növények a valóságban nincsenek, ha léteznének, akkor a biomechanikájuk nagyon hasonló lenne az űrkábel mechanikájához.

A geostacionárius keringési pálya

Amikor a Föld egyenlítőjének síkjában a gravitációs és a centrifugális gyorsulás egyenlő, akkor egy oda helyezett tömeg egyensúlyban van. Ez a Föld középpontjától mért

$$r_{GS} = \sqrt[3]{\frac{\gamma M_F}{\omega^2}} \quad (1)$$

sugarú körpálya esetén teljesül, ahol $\gamma = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ a gravitációs állandó, $\omega = 7,2722 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a Föld forgásának szögsebessége és $M_F = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ a Föld tömege. Az Egyenlítő fölötti, r_{GS} sugarú kör neve geostacionárius pálya. Az e körpályán mozgó műhold Föld körüli keringési ideje megegyezik a Föld tengely körüli forgásának periódusával, azaz pontosan 1 nappal. Emiatt a műhold a Földről távcsövel

nézve az Egyenlítő egy adott pontja fölött állni látszik. Mivel a Föld átlagos sugara $R_F = 6,371 \cdot 10^6$ m, ezért a geostacionárius pálya az Egyenlítő fölött $H = r_{GS} - R_F = 35\,872$ km $\approx 36\,000$ km magasságban húzódik.

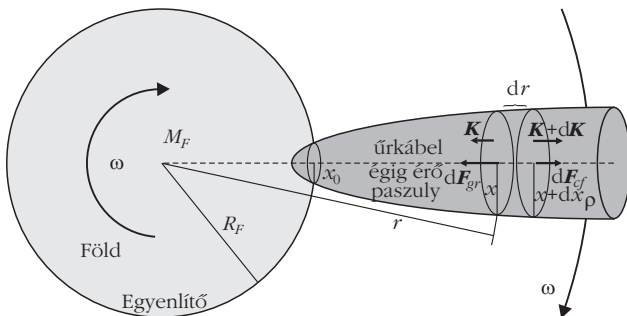
A minimális tömegű terheletlen űrkábel és az égis erő paszuly alakja

Milyen alakúnak kell lennie a földi Egyenlítőhöz rögzített, azzal együtt forgó terheletlen űrkábelnek, amely ellensúly nélkül, csak a centrifugális erőnek köszönhetően feszül ki? Ez nyilván csak akkor valósulhat meg, ha a függőlegesen, azaz a Föld felületére merőlegesen álló, alsó, földhöz rögzített végénél A keresztmetszetű és T^* szakítószilárdságú kábelre ható, a Föld középpontjába mutató F_{gr} gravitációs erő és a kábel alsó végénél ébredő, lefelé irányuló húzóerő maximumának $F_{max} = AT^*$ összege megegyezik a Föld tengely körüli forgásából származó, sugár irányban kifelé mutató F_{cf} centrifugális erővel: $F_{gr} + F_{max} = F_{cf}$. Ha $F_{gr} > F_{cf}$ akkor a kábel a Föld vonzása miatt lehullik, ha viszont $F_{gr} + F_{max} < F_{cf}$ akkor a kábel az alsó, rögzített végénél elszakadva a centrifugális erő miatt kirepül az űrbe.

Hasonló probléma merül föl egy mesebeli égis erő növénynél is: a növény csak akkor létezhetne, ha olyan lenne a szárának alakja, hogy a Föld rá ható gravitációs erejének és a gyökere által kifejtett, lefelé irányuló maximális húzóerőnek az összegét kiegyensúlyozná a növényen ébredő, fölfelé mutató centrifugális erő. Ekkor a növény szára nem roskadna össze a saját súlya alatt, de a centrifugális erő sem tépné ki a földből gyökerestül.

Tekintsük a Földhöz rögzített terheletlen űrkábel (vagy égis erő paszuly) 2. ábra szerinti mechanikai modelljét. Vegyük a homogén ρ sűrűségű, forgásszimmetrikus kábelnek az R_F sugarú és M_F tömegű Föld középpontjától r távolságra lévő elemi dr vastagságú rétegét. E réteg r távolságra lévő alsó körlapjának sugara legyen $x(r)$, míg a felső körlapjáié $x+dx$. A rétegre hat a Föld középpontjába, lefelé mutató elemi dF_{gr} gravitációs erő, a Föld középpontjától sugárirányban kifelé, fölfelé irányuló elemi dF_{cf} centrifugális erő, valamint az alsó, illetve felső körlapján ébredő lefelé, illetve fölfelé mutató K , illetve $K+dK$ fel-

2. ábra. A Földhöz rögzített terheletlen űrkábel, illetve égis erő paszuly magasságfüggő minimális $x(r)$ sugarának meghatározásához.



leti húzóerő, amit a kábel réteg alatti, illetve fölötti része fejt ki. A kábel vizsgált elemi rétege akkor van egyensúlyban, ha e négy erő eredője nulla:

$$K + dK + dF_{cf} - K - dF_{gr} = 0$$

$$\downarrow$$

$$dK + dF_{cf} = dF_{gr}. \quad (2)$$

Ha a kábel $2x(r)$ vastagságát a tömege minimalizálása céljából az elszakadás határáig csökkentjük, akkor a bármely keresztmetszetén ébredő mechanikai feszültség megegyezik a T^* szakítószilárdsággal. Foglalkozunk azzal a speciális, matematikailag könnyebben kezelhető esettel, amikor az űrkábel mentén végig azonos T mechanikai feszültség ébred, vagyis amikor T független a Föld középpontjától mért r sugártól. Ekkor a kábel elemi dr vastagságú rétegének alsó körlapján

$$K = T x^2 \pi \quad (3)$$

húzóerő ébred. (3)-at x szerint deriválva megkapjuk K elemi dK megváltozását a kábel x sugarának elemi dx megváltozásakor:

$$dK = 2 T \pi x dx. \quad (4)$$

Az elemi kábelre ható centrifugális és gravitációs erők:

$$dF_{cf} = x^2 \pi dr \rho r \omega^2, \quad (5)$$

$$dF_{gr} = \frac{\gamma M_F x^2 \pi dr \rho}{r^2}. \quad (6)$$

(2–6) fölhasználásával, rendezés után kapjuk a

$$\frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2T} \left(\frac{\gamma M_F}{r^2} - \omega^2 r \right) dr \quad (7)$$

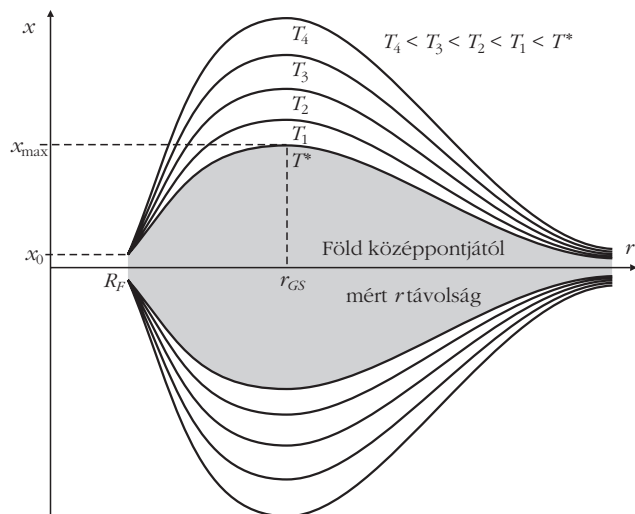
elsőrendű, szeparábilis differenciálegyenletet. Ezt integrálva, az $x(r=R_F) = x_0$ peremfeltétel alkalmazásával megkapjuk a bármely keresztmetszetén $T < T^*$ mechanikai feszültségű terheletlen űrkábel $x(r)$ sugarát a Föld közepétől számított r távolság függvényében:

$$x(r) = x_0 \exp \left\{ \frac{\rho}{2T} \left[\gamma M_F \left(\frac{1}{R_F} - \frac{1}{r} \right) + \frac{\omega^2}{2} (R_F^2 - r^2) \right] \right\}. \quad (8)$$

(8)-ből látható, hogy $x(r=\infty) = 0$. Az űrkábel $x(r)$ sugarának azon r^* távolságban van maximuma, ahol az r szerinti első deriváltja zérus. Innen azt kapjuk, hogy

$$r^* = r_{GS}. \quad (9)$$

Arra az eredményre jutottunk tehát, hogy a homogénn feszített ($T = \text{állandó}$) terheletlen űrkábel (égis



3. ábra. A Földhöz rögzített terheletlen űrkábel (illetve égis erő paszuly szárának) $x(r; T)$ alakja a hossz mentén állandónak feltételezett T mechanikai feszültség függvényében, ahol r a Föld középpontjától mért távolság, R_F a Föld sugara, r_{GS} a geostacionárius pálya távolsága a Föld középpontjától, x_0 a kábel sugara a Föld felszínén, $x_{\max}(T = T^*)$ pedig a kábel maximális sugara r_{GS} -nél. Szürke árnyalat jelzi a $T = T^*$ szakítószilárdsághoz tartozó legvékonyabb, azaz leginkább anyagtakarékos alakot. Az ábrázolás nem méretarányos.

éris paszuly) átmérője a Föld felszínétől fölfelé haladva a geostacionárius pályáig ($r < r_{GS}$) egyre nő, onnantól ($r > r_{GS}$) pedig fokozatosan csökken, tehát a kábel a geostacionárius pályán a legvastagabb. (8) és (9) alapján megkapjuk a kábel „kihasodásának” mértékét, vagyis a geostacionárius távolságbeli x_{\max} legnagyobb sugarának és a földfelszíni x_0 sugarának $Q = x_{\max}/x_0 = x(r_{GS})/x_0$ arányát:

$$Q = \frac{x_{\max}}{x_0} = \exp \left\{ \frac{\rho}{2T} \left[\gamma M_F \left(\frac{1}{R_F} - \frac{1}{r_{GS}} \right) + \frac{\omega^2}{2} (R_F^2 - r_{GS}^2) \right] \right\} = \exp \left(\frac{\rho}{T} B \right), \quad (10)$$

ahol $B = 2,6337 \cdot 10^8 \text{ m}^2/\text{s}^2$. (10)-ből kifejezhetjük azt a $T(Q, \rho)$ állandó mechanikai feszültséget, ami az űrkábel mentén ébred adott Q kihasodás és ρ sűrűség mellett:

$$T(Q, \rho) = \frac{\rho}{2 \ln Q} \left[\gamma M_F \left(\frac{1}{R_F} - \frac{1}{r_{GS}} \right) + \frac{\omega^2}{2} (R_F^2 - r_{GS}^2) \right] = \frac{\rho B}{\ln Q}. \quad (11)$$

Látható (11)-ből, hogy $T(Q, \rho)$ egyenesen arányos a ρ sűrűséggel, és fordítva arányos a Q kihasodás természetes alapú logaritmusával, az arányossági tényező pedig a Föld R_F sugarától, M_F tömegétől és ω forgási szögsebességétől függ. Vizsgáljuk meg ezek után, hogy miként viselkedik a homogén T mechanikai

feszültségű terheletlen űrkábel (8) szerinti alakja T változásakor. Mivel $dr > 0$, ezért (7) alapján a kábel $x(r)$ sugara elemi dx megváltozásának előjelére a következő igaz: ha $r < r_{GS}$, akkor $dx > 0$; ha pedig $r > r_{GS}$, akkor $dx < 0$. Innen pedig az következik, hogy ha T csökken, akkor $|dx|$ nő. Mindennek az a végkövetkezménye, hogy T csökkenésével Q és $x(r)$ nő. A 3. ábra vázlatosan szemlélteti a terheletlen űrkábel (illetve a mesebeli égis erő paszuly szárának) alakját T függvényében. Ha az állandónak feltételezett T feszültséget növeljük, akkor az űrkábel egyre karcsúbb, azaz egyre anyagtakarékosabb lesz. T nem haladhatja meg a T^* szakítószilárdságot, különben elszakadna a kábel. A 3. ábrán szürkével jelölt alak a kábel alakjának szélsőértéke, mikor $T = T^*$: ennél vékonyabb, anyagtakarékosabb, kisebb tömegű kábel elszakadás nélkül nem képzelhető el.

Az ellensúllyal kifeszített terheletlen űrkábel

Az űrkábel végtelen hosszát úgy rövidíthetjük, hogy a geostacionárius pályán túl, attól L távolságban elvágjuk és például egy gömb alakú, R sugarú, m tömegű homogén ellensúlyhoz rögzítjük az $x(r_{GS}+L)$ sugarú felső végét (4. ábra). Az ellensúly kábelre kifejtett gravitációs vonzóerejét elhanyagoljuk. A terheletlen űrkábel egyensúlyban tartásához ezen felső végénél $x(r_{GS}+L)^2 \pi T$ nagyságú, sugár irányban kifelé mutató húzóerő szükséges, amit az ellensúlyra ható centrifugális és gravitációs erők különbsége biztosít:

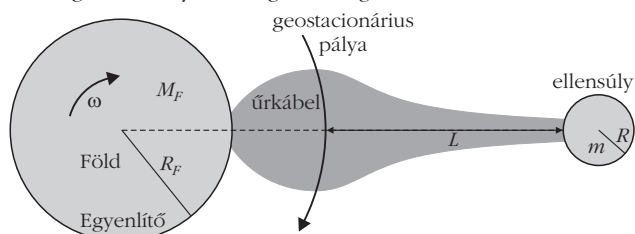
$$x(r_{GS}+L)^2 \pi T = m(r_{GS}+L+R) \omega^2 - \frac{\gamma m M_F}{(r_{GS}+L+R)^2}. \quad (12)$$

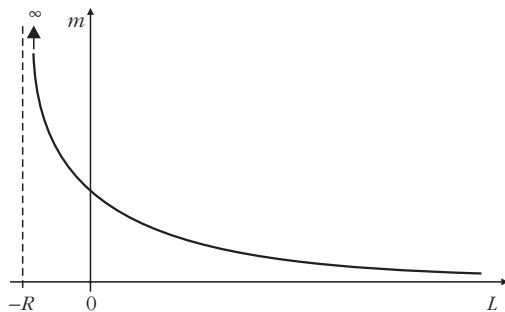
Innen az $r_{GS}+L$ hosszúságú terheletlen űrkábel kifeszítéséhez szükséges ellensúly tömege:

$$m(L) = \frac{\pi T x(r_{GS}+L)^2}{(r_{GS}+L+R) \omega^2 - \frac{\gamma M_F}{(r_{GS}+L+R)^2}}. \quad (13)$$

Mivel $\lim_{L \rightarrow \infty} x(r_{GS}+L) = 0$, ezért (13)-ból adódik: $\lim_{L \rightarrow R} m(L) = \infty$, és $\lim_{L \rightarrow \infty} m(L) = 0$. Az 5. ábra a (13) szerinti $m(L)$ függvényt szemlélteti vázlatosan. A terheletlen űrkábel kifeszítéséhez szükséges m tömeg nullához tart, amint a kábel geostacionárius pályán túlnyúló L hossza a végtelenhez közelít, továbbá m végtelenhez tart, amint L megközelíti $-R$ -et.

4. ábra. A véges hosszúságú terheletlen űrkábel kifeszítéséhez szükséges ellensúly m tömegének meghatározásához.





5. ábra. A Földhöz rögzített terheletlen űrkábel kifeszítéséhez szükséges m tömeg a kábel geostacionárius pályán túlnyúló L hossza függvényében, ahol R a gömb alakú ellensúly sugara.

Az űrkábel és az égig érő paszuly terhelhetősége

Az űrkábel fő rendeltetése a magasba történő teher szállítás, mint ahogy a mesebeli égig érő paszulyra is fölmászik a meshős. Határozzuk meg ezért, hogy adott $x(r, T < T^*)$ alakú, terheletlenül homogénean feszülő űrkábel a Föld közepétől r távolságban mekkora m tömeggel terhelhető, ha e tömeg a gyorsulással mozog a 6. ábra szerinti módon. Mivel a kábel addig terhelhető, amíg az $x(r, T)^2 \pi$ nagyságú keresztmetszetén ébredő T mechanikai feszültség nem haladja meg a T^* szakítószilárdságot, ezért az r helyen a kábelre maximum $F_{\max} = (T^* - T) \pi x(r, T)^2$ többleterő hathat. A kábel addig nem szakad el, amíg az a gyorsulással mozgó m tömegre ható $F_{gr} = \gamma m M_F / r^2$ gravitációs erő, az ma tehetetlenségi erő és az $F_{cf} = m r \omega^2$ centrifugális erők (6. ábra) különbségének abszolút értéke kisebb, mint F_{\max} :

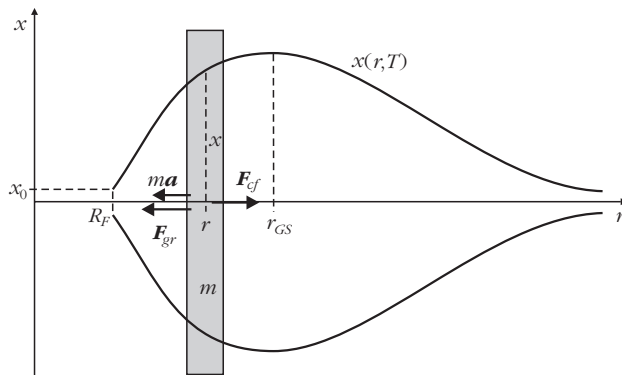
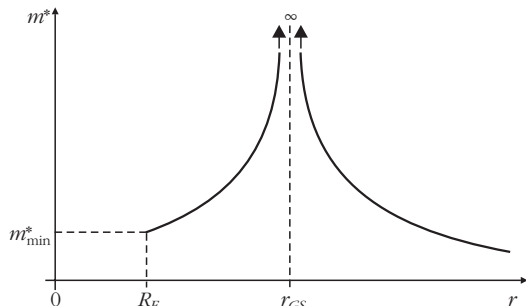
$$m \left| \frac{\gamma M_F}{r^2} + a - r \omega^2 \right| < (T^* - T) \pi x(r, T)^2. \quad (14)$$

Innen kapjuk:

$$m < m^*(r) = \frac{(T^* - T) \pi x(r, T)^2}{\left| \frac{\gamma M_F}{r^2} + a - r \omega^2 \right|}, \quad (15)$$

ahol $x(r, T)$ kifejezését (8) adja. A (15) szerinti $m^*(r)$ tömeg változását r függvényében a 7. ábra mutatja. Látható, hogy $\lim_{r \rightarrow r_{GS}} m^*(r) = +\infty$, és mivel $m^*(r)$ az

7. ábra. Adott $x(r, T < T^*)$ alakú űrkábel a Föld középpontjától r távolságban terhelő, a gyorsulással m tömeg $m^*(r) > m$ felső határának függése r -től. A vízszintes tengely skálája nem méretarányos.



6. ábra. Az adott $x(r, T < T^*)$ alakú űrkábel terhelő, a gyorsulással m tömeg nagyságának meghatározásához. Az ábrázolás nem méretarányos.

$R_F \leq r \leq r_{GS}$ tartományban monoton nő, ezért ott m^* minimuma:

$$m_{\min}^* = m^*(r = R_F) = \frac{\pi (T^* - T) x_0^2}{\left| \frac{\gamma M_F}{R_F^2} + a - R_F \omega^2 \right|}, \quad (16)$$

mert $x(r = R_F) = x_0$. Az űrkábel tehát a Föld felszínén terhelhető a legkisebb m_{\min}^* tömeggel, és mivel a centrifugális erő fölfelé nő, míg a gravitációs erő csökken, ezért egyre följebb fokozatosan nagyobb tömeggel lehet terhelni a 7. ábra szerinti módon. A geostacionárius pályán a teher akármekkora lehetne, hiszen ott súlytalansági állapot uralkodik a Földdel együtt forgó koordináta-rendszerben. Ha tehát a Földről akarunk egy terhet az űrkábelre szállítani a geostacionárius pályán keringő űrállomásra, s a teher a kábelre való közlekedése során legföljebb a gyorsulással mozoghat (gyorsulhat: $a > 0$ vagy fékeződhet: $a < 0$), akkor a teher tömege nem lehet nagyobb, mint a (16) szerinti m_{\min}^* . Innen adódik:

$$(T^* - T) x_0^2 > \frac{m}{\pi} \left(\frac{\gamma M_F}{R_F^2} + a - R_F \omega^2 \right). \quad (17)$$

(17) ad lehetőséget a terhelhető űrkábel tervezésére: ha ismerjük, hogy mekkora m tömegű terhet szeretnénk az űrkábelre a geostacionárius pályára fölvennünk, s tudjuk, hogy közben a teher legföljebb mekkora a gyorsulással mozoghat, akkor (17)-ből T , illetve x_0 ismeretében x_0 , illetve T értéke kiszámítható, aminek fölhasználásával megkapható az m tömeggel terhelhető űrkábel (8) szerinti $x(r)$ alakja.

Irodalom

1. J. D. Isaacs, A. C. Vine, H. Bradner, G. E. Bachus: Satellite elongation into a true „sky-hook”. *Science* 151 (1966) 682–683.
2. V. Lvov: Sky-hook: old idea. *Science* 158 (1967) 946–947.
3. K. E. Ebisch: Skyhook: another space construction project. *American Journal of Physics* 50 (1982) 467–469.
4. Babcsán N., Somogyvári B.: Anyagtudománnyal átvitt távolságok. *Természet Világa* 136 (2006) 348–350.
5. Berze-Nagy J.: Égigérő fa. in *Magyar mitológiai tanulmányok*. Pécs, 1958.
6. Diószegi V.: A honfoglaló magyarság hitvilágának történeti rétegei – A világfa. in *Népi Kultúra – Népi Társadalom*. Budapest, 1969.

1999 nyarán fogalmazódott meg bennem a következő probléma: Sok helyen sokszor lehet arról hallani, hogy milyen fontos a kultúra egysége, azaz hogy a humán, illetve a természettudományos műveltség egyenértékű, egymást kiegészítik. Viszont, ha a kezünkbe vesszünk egy programfüzetet – ami ugye arra hivatott, hogy szabadidős programot válasszon magának az olvasó – talál benne mozit, színházat, kiállítás, hangversenyt, ..., de a „másik” oldalról szinte semmit.

Természetesen voltak korábban is természettudományos előadások Pécsen, de többnyire csak az egyetemen, szűk szakmai körben. Erről az utca embere többnyire nem is tudott. De ha mégis, akkor sem biztos, hogy szívesen eljött volna például a *főépület A/408-as terembe*. Ezért gondoltam arra, hogy a természettudományos műveltséget fel kell kínálni a szabadidős programok között. Egy civil helyszínre akartam fizika előadás-sorozatot szervezni, nem az egyetem valamelyik előadóterembe. Kapóra jött, hogy *Spolár Attila* barátom a belváros közepén lévő Dominikánus Házban (Pécsi Kulturális Központ) művelődési menedzser. Elmondtam neki az ötletemet, és ő támogatta azt.

1999-ben sokat lehetett hallani a közelgő század-, illetve ezredfordulóról. (Az időszámítással foglalkozó tudósok és csillagászok többsége szerint az ezredforduló 2001. január 1-jén volt.) Az 1999–2000-es tanévben indult előadás-sorozatot *A XX. század fizikája* címmel hirdettük meg. A nyitó előadást *Hraskó Péter* professzor úr tartotta *Tudomány, áltudomány, nem-tudomány* címmel 1999 októberének közepén. Az első évadban még 8 előadás következett. Igen sikeres lett a sorozat. Nagyon jó volt a program reklámja. Azon túl, hogy a helyi médiában meghirdettük az előadásokat, az összes középiskolába kiküldtük a soron következőre invitáló plakátokat és szórólapokat.

A rendezvény nem ingyenes. Kilenc éve 100 Ft volt a belépőjegy ára, ma 300 Ft. Mindez természetesen nem fedezi a költségeket. A többi pályázati úton igyekszünk pótolni. A résztvevők átlagos száma 60–70, de több alkalommal 100 fölé emelkedett. Az előadást látogatók életkora és képzettsége igen különböző. A közönség soraiban legnagyobb számban középiskolások, fizikatanárok, egyetemi oktatók fordulnak elő, de szép számmal akadnak ezen csoportokhoz nem tartozók is. Öröm látni, hogy kialakult egy törzsközönség. Fontos, hogy az előadók is jól érezzék magukat. Panzióban kapnak az előadás estéjére szállást, megtérítjük az útiköltséget, és egy szerény tiszteletdíj is illeti őket.

Először valóban csak a közelgő századforduló apropóján született a program. Igazából nem terveztem hosszan előre. Az előadás-sorozat sikere viszont arra biztatott, hogy folytatni kell. A következő évad már az *Egy kis esti fizika* címet viselte, amely a Dominikánus Ház legsikeresebb sorozatává vált. Az elmúlt 9 évben 81 előadást hirdettünk meg. Csupán 1 előadás maradt el a mostoha útviszonyok miatt.

Íme az eddigi előadók névsora (a zárójelben azt jeleztem, ha valaki több alkalommal is szerepelt):

Almási Gábor, Berkes József (2), Bor Zsolt, Cserti József, Dávid Gyula, Elblinger Ferenc (5), Frei Zsolt, Hámori Krisztián, Härtlein Károly (2), Hraskó Péter (4), Jánosi Imre (2), Janszky József, Jurisits József, Károlybázy Frigyes (4), Kóbor József, Kolláth Zoltán, Kotek László, Kovács Tamás (2), Kürti Jenő, Lakatos Tibor (7), Márki-Zay János (2), Molnár Miklós (3), Németh Judit, Piláth Károly, Rácz Zoltán, Radnai Gyula (7), Rajkovits Zsuzsanna (3), Sánta Imre, Sebestyén Zoltán (4), Simon István, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Szász János, Szűcs József (3), Tél Tamás (3), Ujvári Sándor, Varga Zoltán, Várhegyi András, Vida József, Vonderviszt Ferenc.

A következő tanévben immár a tizedik évad kezdődik. Újdonság, hogy csak olyan előadók lesznek majd a programban, akik eddig nálunk még soha nem szerepeltek. A kilenc új előadóból négyen néhány éve még diákként a hallgatóság soraiban ültek. Ők ma végzős fizikushallgatók, illetve doktoranduszok. A tervek szerint az előadások az interneten is követhetők lesznek.

A 2008/2009-es évad tervezett programja

2008. szeptember 16.: *Tóth Eszter* (Vác, gimnáziumi tanár): *Emlékezés Teller Edére – képekkel, zenével, versekkel*

2008. október 21.: *Vígh Máté* (ELTE, ötödéves hallgató): *Egy kis esti nanofizika*

2008. november 18.: *Szász Krisztián* (ELTE, ötödéves hallgató): *Óriási mágneses ellenállás-változás*

2008. december 16.: *Raffai Péter* (ELTE, PhD-hallgató): *Einstein szimfóniája – a gravitációs hullámok*

2009. január 13.: *Erotyák János* (PTE, egyetemi docens): *Léggöri optikai jelenségek – amelyeket ismerünk, talán ismerni gondolunk és amelyekről még csak nem is ballottunk*

2009. február 17.: *Hebling János* (PTE, egyetemi tanár): *Nagyenergiájú terabertzes impulzusok előállítása és alkalmazása*

2009. március 10.: *Jurányi Zsófia* (Paul Scherrer Institut Villigen, Svájc PhD-hallgató): *Mik azok az aeroszolok, és mi közülük van a globális felmelegedéshez?*

2009. április 21.: *Katz Sándor* (ELTE, egyetemi adjunktus): *Részecskefizika szuperszámítógépeken*

2009. május 19.: *Skrapits Lajos* (ELTE, nyugalmazott egyetemi adjunktus): *Meglepő jelenségek, érdekes fizikai kísérletek – egy nemzetközi verseny tapasztalatai*

Köszönet illeti Lakatos Tibort, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Baranya megyei Csoportjának Tiszteletbeli Elnökét, aki minden előadást nagy ívű felvezetővel konferál be, valamint Szűcs Józsefet, aki a szervezési és pályázati munkában segít. Külön köszönet jár az eddigi előadóknak, és nem utolsó sorban a lelkes közönségnek. Kíváncsian várjuk a tizedik sorozatot.

Kutrovátz Gábor, Láng Benedek, Zemplén Gábor:

A TUDOMÁNY HATÁRAI

Typotex, Budapest, 2008, 376 oldal

Kutrovátz Gábor, Láng Benedek és Zemplén Gábor könyve, *A tudomány határai* egyszerre főnyeremény, aranybánya és feloldozás. A három és félszáz oldal terjedelmű, csevegő stílusban megírt, szüntelenül kérdéseket feltevő esszé a tudomány és áltudomány határainak kijelöléséről, az úgynevezett demarkációs probléma körjárásáról szól.

Hogy a problémát megfelelő színvonalon lehessen felvetni, szükséges a 70 oldalas előkészítés tudományfilozófiából, tudománytörténetből és tudományszociológiából. Erről a részről mondható, hogy *főnyeremény*, mert a gondosan felépített és megírt három fejezet azonnal felfogható, feldolgozható, nem kell hónapokat eltölteni a szakzsargonban megírt, elég nehezen emészthető alpművekkel (bár aki vállalkozik erre, a fejezetenként megadott hivatkozások alapján ezt is megteheti).

Azok számára, akik ebből a könyvből tanulják a szakmát, a demarkációs vonal kitűzésének kényes feladatát, a 140 oldalt kitevő következő öt fejezet valóságos *aranybánya*, hiszen az esettanulmányok elemzése teszi lehetővé a frissen tanultak alkalmazását. Az átlagosan közel 30 oldalas esettanulmányok önmagukban érdekes olvasmányok; a vizsgált problémakörök sokoldalú elemzése újra és újra igazolja, hogy nem adhatók könnyű válaszok.

A maradék 90 oldalra kerül a tudomány és áltudomány örök háborúja néhány epizódjának felelevenítése, majd ennek a harcnak megjelenítése a médiában. A végkövetkeztetés sajátos módon nem a demarkációs probléma megoldása, hanem egyfajta *feloldozás*: „Hagyjuk tehát a tudomány és áltudomány kifejezések használatát a küzdő felekre, és foglalkozunk azzal, hogy... hol, miért és hogyan húzódnak a tudománynak – vagy bármi másnak – nevezett *megbízható tudás* határai.”

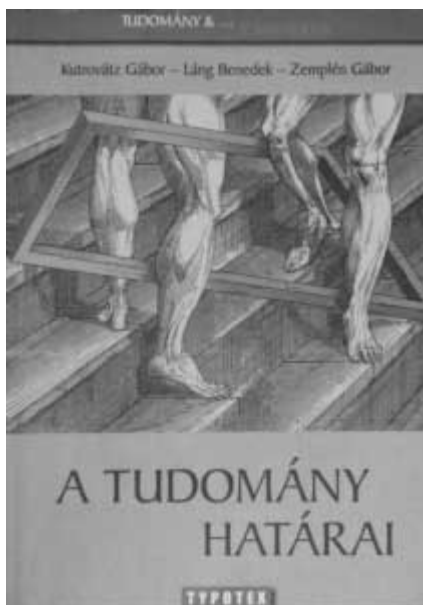
Az egész könyvön nyomon követhető érvek alapján a megbízható tudás forrása bármi más lehet, de nem a tudomány. Több helyen fordulnak elő pontokba szedve a tudományt jellemző tulajdonságok – az objektivitás, a racionalitás, a sikeresség –, de csak azért, hogy

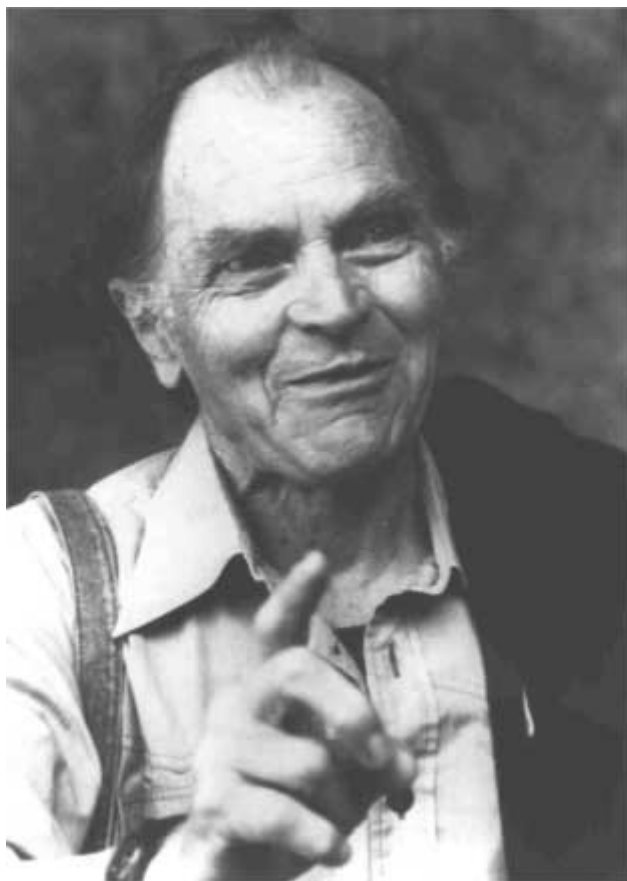
belássuk, ezek a tulajdonságok nem hozhatók közelebbi kapcsolatba a tudománnyal. Úgy tűnik, a szerzőkre akaratlanul is nagy hatást gyakorolt az anarchista tudományfilozófus *Feyerabend*, aki szerint: „A tudomány egyike az ember kialakította számtalan életformának, és nem is föltétlenül a legjobb. Hangos, pimasz, drága és föltűnősködő.” Feyerabend találta ki azt a tréfát is, hogy a tudományos kérdéseket demokratikusan kell eldönteni: „Egyáltalán, a tudományos kérdések eldöntésének mechanizmusa tökéletesen antidemokratikus, hiszen sohasem kérdezik meg a lakosságot, sohasem szavazzuk meg, miben akarunk hinni a természeti világgal kapcsolatban.”

Az esettanulmányok számos helyén találkozhatunk a protekcionizmus feyerabendei vádjával: „...a tudomány nem eredményei miatt győzedelmeskedik más ideológiák fölött, hanem mert a versenyt az ő érdekében manipulálják.”

A szerzők az utolsó fejezetben azt írják, hogy, „...ha a könyv unalmas, azt nyugodt szívvel elfogadjuk. Ha kiderül, hogy elfogult, azt valódi hibának fogjuk tartani.” Nos, a könyv egy percig nem unalmas, a letehetetlen könyvek kategóriájába tartozik. Azt sem lehet mondani, hogy a tudomány vagy az áltudomány *mellett* elfogult lenne. De azt igen, hogy a tudományok, mindenek előtt a természettudományok *ellen* elfogult. Különösen jól érezhető ez az esettanulmányok kidolgozásánál.

A csillagjósolás esetében például hamar elmerül a részletekben, az asztrológia tudományossága mellett és ellen felhozható érvek latolgatásában. Holott az asztrológia, mint jósló tudomány esetében a természettudomány legfeljebb kompromittálhatja magát. Mit várhatunk a tudománytól az elzárkózáson kívül, amikor a földi életre legfeljebb egy becsapódó kisbolygó lehetne hatással, amivel viszont az asztrológia nem foglalkozik. Az össze nem mérhetőség sajátosan fogalmazódik meg a végkövetkeztetésben: „Az asztrológia olyan történeti hagyományokra épülő gyakorlat, amelynek a fő feladata az, hogy az emberek tájékozódását segítse, még ha nem is tudja megmagyarázni





Feyerabend, a tudomány mumusa

mechanizmusának alapelveit.” (149. o.) Homályban marad, hogy a feladat megoldására, akár magyarázatlanul is, van-e esélye.

A természettudományos kutatás elvileg határtalanul költséges, nincs hatékony magánváltozata. *Dürrenmatt* Öreg hölgye is csak Nobel-díjast vesz magának, nem részecskegyorsítót. A tudománypolitika az államok részéről megkerülhetetlen.

A kreacionizmus esetében nemigen lehet kimutatni a tudományosságot, de legalább a tudomány kompromittálására alkalmas: „Mai világunkban a tudomány és a hatalom szorosan összefonódott – kicsit úgy, ahogy korábbi évszázadokban a vallás és a hatalom. A kreacionizmus rámutat ennek az összefonódásnak a problematikusságára.” (186. o.)

A történelmi áltudományokat vizsgáló fejezetben a szerzők távolról sem olyan tartózkodók az akadémiai tudomány érveivel szemben, mint a természettudományoknál megszoktuk. A holokauszttagadók, a középkorból három évszázadot elvitatók, a da Vinci-kód ürügyén az Újszövetséget felforgatók vagy *Däniken* földönkívüli joggal kerülnek kívül a tudományon. Annál is inkább, mert maguk sem állítják, hogy belül lennének, csak ötletek tudományoskodó tálalásáról van szó. Akárcsak az asztrológiánál, mondhatnánk, de nem mondjuk, mert a csillagjósolásnak legalább impozáns története van, és mert hálásak vagyunk a szerzőknek az összeesküvés-elméleteket ebben a fejezetben frapánsan és szellemesen elemző bekezdéseikért.

A szerzők maguk is érzik, hogy az esettanulmányok közül ennek a fejezetnek más a hangvétele: „Nem elégedtünk meg azzal, hogy összefoglaljuk az érveket és ellenérveket, hanem harcosan az egyik fél, az *ortodox* tudomány képviselőinek oldalára álltunk, érveik szócsövénévé szegődve.” Megtehettük, mert „...igyekeztünk olyan szempontokat találni, amelyek teljesülésekor az amúgy kétes értékű »áltudomány« megbélyegzés okkal használható.” (211–212. o.) A társadalomtudományokkal szemben a szerzők szerencséjére nem elfogultak.

A negyedik esettanulmány, a parapszichológia történetéből kiderül, hogy ez a diszciplína mindent elkövetett, hogy az akadémikus tudomány befogadja. *Uri Geller* kanálhajlításai nem a tudományos megalapozottságot, inkább a figyelemfelkeltést szolgálták. A szerzőknek itt is kevesebb bajuk van Gellerrel, mint az ellene fellépő *James Randi* bűvésszel, aki Geller mutatóanyagait bűvésztükként, parapszichológiai csalásként magyarázza. A szerzők elemzése szerint „...a csaláshipotézis számos tekintetben szimmetrikus a parapszichológia elméleteivel: mint tudomány magyarázóelv semmivel sem megalapozottabb”. (234. o.) A szerzők szándéka ellenére ennek az összehasonlításnak lehet olyan olvasata, hogy parapszichológia és család tehát valahogy együtt járnak.

Az ötödik esettanulmány a *Keleti tűk nyugati testekben* címet viseli és színesen, sokoldalúan számol be a nyugati orvostudomány és a hagyományos kínai orvoslás viszonyosságáról, de nem eredménytelen ismerkedési próbálkozásairól.

Az előkészítés után a könyv utolsó negyedére marad a tudomány határainak felderítése. Hamar kiderül, hogy nincsenek tartósan érvényes határok, majd számos, a tudománnyal kapcsolatban felmerülő gond kerül elő. A filozófia és pszichológia közötti határmunkálatok eredményeképpen megtudjuk, „hogy a 20. század elején még megbízhatónak és függetlennek tartott logika is olyan, amelyet számos esetben szinte semelyikünk nem alkalmaz egyes következtetési helyzetekben – mégis elég jól elboldogulunk mindennapjainkban”. (290. o.)

Logikával vagy anélkül, de az érvelés tudománya sokat segíthet nézeteink hatásos kifejtésében. A szerzők közül kettőnek módjában volt nyilvános vitában érvelni a lapos Föld mellett. Sikerrel tették: „Egyikünk csillagász lévén, körülbelül tudtuk az ellenfél várható érveit, így nem volt más feladatunk, mint tudománytörténeti ismereteink, leleményességünk és arcátlan-ságunk korlátain belül minden lehetséges eszközt megragadva kialakítani stratégiánkat.” (267. o.)

A könyv egészét tekintve azonban a szerzők továbbra is a sokoldalú megvilágítás módszerét követik, és a határok kijelölhetőségének bizonytalanságát további esettanulmányokkal igazolják, vizsgálva egyebek között a frenológia kiszorulását a tudományok közül, és a kilencvenes évek posztmodern tudománykritikája által kiváltott tudományháborút. Ennek leírásánál meglepő módon cserbenhagyta a szerzőket egyébként végig jelenlevő humorérzékük, és *Sokal*

ötletes stílusparódiájával – *Arccal a kvantumgravitáció transzformatív bermenautikája felé* – kapcsolatban nem a csínyre, hanem a megjelenést követő botrányra koncentráltak.

Fejezetcímként merül fel a kérdés: *Mit csináljon az Olvasó*, tehát az átlagember, a tudomány berkein kívül. De továbbmenve – ez a nyájas olvasó nagyjából azt jelenti, hogy bárki, hiszen egy tudós a tudomány egészét tekintve kívülálló, akár egy könyvelő az általa nyilvánított vagyonhoz képest, és legfeljebb rossz lelkiismerettel jelölteti ki fekhelyét egy ingás sarlatánnal. A tanácsot, miszerint a rossz színvonalú tv-vitákra ne figyeljünk oda, érdemes megfogadni, legyen bárki az Olvasó.

A tudomány és a nyilvánosság kapcsolatát boncolgató fejezet rámutat, hogy a kurrens kérdésekben a tudomány nem ad biztos fogódzót. Nyilván, hiszen akkor nem kurrens kérdéstről, hanem megoldott problémáról lenne szó. „Ha növeljük a tudományos oktatás és tájékoztatás súlyát... beteljesítjük a felvilágosítás folyamatát.” (318. o.) Ezzel jellemzik a szerzők a számukra ellenszenves deficitmodellt, amely valóban nem jelenti a megoldást. A javasolt kontextusmodell kétségtelenül hatékonyabb, ha képes működni, „...nem arról van szó, hogy a tudásnak áramolnia kell a tudósoktól a laikusok felé, akik magukba szívják, hanem sokkal inkább arról, hogy a laikusok alkotta társadalmi környezet kérdésekkel fordul a tudományhoz, melyekre választ vár. Míg a deficitmodell a kész tudomány befogadására buzdít, addig a kontextusmodell a készülő tudomány és a laikus környezet interakciójának igényét hirdeti.” (319. o.) Ez az interakció akkor működhet, ha a kész tudományból elegendő ismeret áll rendelkezésre a készülő tudomány válaszainak megértéséhez.

A vázolt idealizáló képnek felel meg a média szerepének láttatása. Mintha az újságírók lennének kiszolgáltatva a konzervatív tudomány túlzó követeléseinek. Ilyen példát is lehet találni, és az is igaz, hogy általában hatástalan a sajtó közvetlen bírálata az áltudományok népszerűsítése miatt – marad a szerzők által javasolt kölcsönös megismerésen alapuló együttműködés.

Az utolsó – talán nem véletlenül 13. – fejezet az eddigiek összefoglalásaként megállapítja, hogy a demarkációs problémának csak ritkán van megoldása, hiszen „Számos tartalmi vagy módszertani oka lehet annak, hogy egy kutatási hagyományt nem tartunk befogadhatónak az akadémiai életbe és oktathatónak az egyetemeken, de ezen okok alapján, amint már láttuk, nem tudjuk összegyűjteni a szükséges és elégséges feltételek azon halmazát, amellyel véglegesen és örökké elkülöníthető, mi tudomány és mi nem az.” (347. o.)

Ez a „véglegesen és örökké” valóban elég riasztó feltétel. De a négydimenziós térídő egy adott pontján a tudományos fogalmakkal bélelt halandzsa (rákterápiák, vízaútó), a tudományos tapasztalat kizárólag verbális tagadása (örökmozgók, vákuumenergia ki-csatolók) és egyéb, a tudományosság mezébe öltöztetett kóklerségek csak tekinthetők tudománytalanok. Mindez arra utal, hogy *több dolgok vannak földön és égen*, amelyek szorosán kötődnek a (közlebről nem definiált) tudományokhoz, de kívül vannak a könyv vizsgálódási körén. Miközben ami belül van, az is rengeteg, és nagyszerűen, sokoldalúan és élvezetesen feldolgozott, ha a végső célként megjelölt *megbízható tudás* határainak kijelölésére legfeljebb szüntelenül törekedhetünk.

Füstöss László

HÍREK – ESEMÉNYEK

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Közhasznúsági jelentése a 2007. évről

A Fővárosi Bíróság 1999. április hó 26-án kelt 13. Pk. 60451/1989/13. sz. végzésével a 396. sorszám alatt nyilvántartásba vett Eötvös Loránd Fizikai Társulatot közhasznú szervezetnek minősítette. Ennek megfelelően a Társulatnak beszámolási kötelezettsége teljesítése során a közhasznú szervezetekről szóló (módosított) 1997. évi CLVI. törvény, a számvitelről szóló 2000. évi C. törvény, valamint a számviteli beszámolóval kapcsolatban a számviteli törvény szerinti egyéb szervezetek éves beszámoló készítésének és könyvvezetési kötelezettségének sajátosságairól szóló 224/2000 (XII.19) Korm. sz. rendeletben foglaltak szerint kell eljárnia. A jelen közhasznúsági jelentés az említett jogszabályok előírásainak figyelembevételével készült.

I. rész – Gazdálkodási és számviteli beszámoló Mérleg és eredménykimutatás

A Társulat 2007. évi gazdálkodásáról számot adó mérleget a jelen közhasznúsági jelentés 1. sz. melléklete tartalmazza. A 2. sz. mellékletként csatolt eredménykimutatás szerint jelentkezett –418 eFt tárgyévi eredmény a mérlegben tőkeváltozásként kerül átvezetésre.

Költségvetési támogatás és felhasználása

Az állami költségvetésből származó közvetlen támogatást a Társulat 2007-ben nem kapott, a pályázati úton elnyert támogatásokat a 2. sz. mellékletben fog-



Kádár György főtitkári beszámolóját tartja

lalt eredmény-kimutatás tartalmazza. A 2006. évi szemlélyi jövedelemadó 1%-ának a Társulat céljaira történt felajánlásából a tárgyévben 1319 eFt bevétele származott. Ezt az összeget a Társulat teljes egészében a *Fizikai Szemle* nyomdai költségeinek részleges fedezeteként használta fel.

Kimutatás a vagyon felhasználásáról

E kimutatás elkészítéséhez tartalmi előírások nem állnak rendelkezésre, így a Társulat vagyonának felhasználását illetően csak a mérleg forrásoldalának elemzésére szorítkozhatunk. A Társulat vagyonát tőkéje testesíti meg, amely a tárgyév eredményének figyelembe vételével 418 eFt értékben csökkent. Így az 1989. évi állapotot tükröző induló tőkéhez (7 581 eFt) képest a tárgyév mérlegében mutatkozó, halmozott tőkeváltozás (-1 910 eFt) ezzel az értékkel kisebbedett, értéke tehát jelenleg -2 328 eFt. Így a Társulat saját tőkéjének jelenlegi, a mérleg szerint és a tárgyév eredményének figyelembevételével számított értéke 5 253 eFt, szemben a tárgyévet megelőző, 2006. évre vonatkozó, hasonlóképpen számított 5 670 eFt tőkeértékkel.

Cél szerinti juttatások

A Társulat valamennyi tagja – a fennálló tagsági viszony alapján – a tagok számára természetben nyújtott, cél szerinti juttatásként kapta meg a Társulat hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 2007-ben megjelentetett évfolyamának számait.

Kiemelt támogatások

A Társulat 2007-ben cél szerinti, a Khtv. 26. §. c.) pontjának hatálya alá eső feladatainak megoldásához az alábbi támogatásokban részesült (a vonatkozó rendelkezésben megadott forrásokra szorítkozva, ezer Ft-ban):

| | |
|-------------------------------------|---------|
| • Központi költségvetési szervtől | 0 eFt |
| • Elkülönített állami pénzalapoktól | 0 eFt |
| • Helyi önkormányzatoktól | 140 eFt |

| | |
|--|-------|
| • Kisebbségi területi önkormányzatoktól | 0 eFt |
| • Települési önkormányzatok társulásától | 0 eFt |
| • Egészségbiztosítási önkormányzattól | 0 eFt |
| • Egyéb közcélú felajánlásból | 0 eFt |

A fenti összesítés magában foglalja a megadott forrás-helyek alsóbb szervei által nyújtott támogatásokat is.

Vezető tisztségviselőknek nyújtott juttatások

A Társulat vezető tisztségviselői ezen a címen 2007-ben semmilyen külön juttatásban nem részesültek. A tisztségviselők a Társulat tagjaiként, a Társulat valamennyi tagjának a tagsági viszony alapján járó cél szerinti juttatásként kapták meg a *Fizikai Szemle* 2007. évi évfolyamának számait.

II. rész – Tartalmi beszámoló a közhasznú tevékenységről

A közhasznú szervezetként való elismerésről szóló, a jelentés bevezetésében idézett bírósági végzés indoklásában foglaltak szerint a Társulat cél szerinti tevékenysége keretében a Khtv. 26.§. c) pontjában felsoroltak közül az alábbi közhasznú tevékenységeket végzi:

- (3) tudományos tevékenység, kutatás
- (4) nevelés és oktatás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés;
- (5) kulturális tevékenység;
- (6) kulturális örökség megővése;
- (19) az euroatlanti integráció elősegítése.

A *tudományos tevékenység és kutatás* területén a tudományos eredmények közzétételének, azok megvitatásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadódulések, valamint más tudományos rendezvények szervezését és lebonyolítását emeljük ki.

A társulat szervezésében – az érintett szakcsoportok közreműködésével – az alábbi rendezvényekre került sor.

A hazai részvétellel megtartott és a Társulat, illetve szakcsoportjai által rendezett tudományos, szakmai továbbképzési célú és egyéb rendezvények közül meg kívánjuk említeni az alábbiakat:

- a Statisztikus Fizikai Szakcsoport *Statisztikus fizikai nap* című rendezvénye, Budapest, 2007. április 11.
- a Sugárvédelmi Szakcsoport *32. Sugárvédelmi továbbképző tanfolyama*, Hajdúszoboszló, 2007. április 17–19.
- a Diffrakciós és az Anyagtudományi Szakcsoport *őszki iskolája*, Gyöngyöstarján, 2007. október 1–3.
- a Rézecskefizikai Szakcsoport *elméleti fizikai iskolája*, Gyöngyöstarján, 2007. augusztus 28. – szeptember 1;
- az Ortvay Kollégium keretében rendezett *Marx György Emlékülés* 2007. május 24-én;
- A Társulat 3 évenként megrendezésre kerülő *Fizikus Vándorgyűlése*, 2007. augusztus 22–24.

A Társulat elnöksége – a rendszeresen megtartott elnökségi ülésekhez csatlakozóan – nyilvános klub-délutánt szervezett.

A 2007. év mérlege

| Megnevezés | Előző év (eFt) | Tárgyév (eFt) |
|---|----------------|---------------|
| <i>A. Befektetett eszközök</i> | 1 474 | 1 605 |
| <i>B. Forgóeszközök</i> | 12 543 | 3 454 |
| Követelések | 464 | 534 |
| Pénzeszközök | 12 079 | 2 920 |
| <i>C. Aktív időbeli elhatárolások</i> | 7 144 | 7 516 |
| Eszközök (aktívák) összesen | 21 161 | 12 575 |
| <i>D. Saját tőke</i> | 5 670 | 5 253 |
| Induló tőke | 7 581 | 7 581 |
| Tőkeváltozás | -2 010 | -1 910 |
| Tárgyévi eredmény | 99 | -418 |
| <i>F. Kötelezettségek</i> | 15 291 | 7 020 |
| <i>G. Passzív időbeli elhatárolások</i> | 200 | 302 |
| Források (passzívák) összesen | 21 161 | 12 575 |

A Társulat szakcsoportjainak egyéb tevékenységét érintve ki kell emelnünk a Részecskefizikai, a Termodynamikai, valamint a Vákuumfizikai Szakcsoport szemináriumszervező munkáját, továbbá a Csillagászati Szakcsoport közreműködését az Országos Csillagászati Szeminárium előadásainak szervezésében. E rendszeresen tartott szemináriumok, előadói ülések a szakmai közélet értékes fórumai.

A Társulat szakcsoportjai és területi csoportjai a külön említettekén kívül – önállóan, vagy a fizika területén működő kutatóhelyekkel közösen, egyedi jelleggel vagy rendszeres időközönként – számos alkalommal rendeztek szakmai jellegű összejöveteleket, előadói üléseket, tudományos és ismeretterjesztő előadásokat, szervezték tagjaik részvételét külföldi szakmai konferenciákon.

A nevelés és oktatás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés és a kulturális tevékenység területein végzett szerteágazó munka zöme a Társulat oktatási szakcsoportjai, valamint területi csoportjai szervezésében folyt. A fizikatanári közösség számára módszertani segítséget, a tapasztalatcsere és szakmai továbbképzés lehetőségét kínálták a két oktatási szakcsoport által 2007-ben is megrendezett, elismert továbbképzésként akkreditált fizikatanári ankétok, így

- az *50. Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszköziállítás*, Szeged, 2007. március 15–18.

- a *31. Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszköziállítás*, Vásárosnamény, 2007. június 25–28.

A Társulat szervezésében fizikatanárok 45 fős csoportja vett részt 2007. augusztus 11–19. között a CERN-ben magyar nyelven megtartott szakmai továbbképzésen.

A Társulatnak a képességfejlesztés szolgálatában álló versenyszervező tevékenysége az általános iskolai korosztálytól kezdve az egyetemi oktatásban résztvevőig terjedően kínál felmérési lehetőséget a fizika iránt fokozott érdeklődést mutató diákok, hallgatók számára. A területi szervezetek többsége szervez he-

Eredménykimutatás a 2007. évről

| Megnevezés | Előző év (eFt) | Tárgyév (eFt) |
|---|----------------|---------------|
| <i>A. Összes közhasznú tevékenység bevétele</i> | 78 343 | 50 643 |
| Közh. célú műk.-re kapott támogatás | 17 365 | 14 884 |
| Központi költségvetéstől | 0 | 0 |
| Helyi önkormányzattól | 445 | 140 |
| Egyéb | 16 920 | 14 744 |
| ebből SzJA 1% | 795 | 1 319 |
| Pályázati úton elnyert támogatás | 17 790 | 4 560 |
| Közh. tevékenységből származó bevétel | 34 464 | 22 291 |
| Tagdíjból származó bevétel | 8 452 | 8 498 |
| Egyéb bevétel | 272 | 410 |
| <i>B. Vállalkozási tevékenység bevétele</i> | 0 | 0 |
| <i>C. Összes bevétel</i> | 78 343 | 50 643 |
| <i>D. Közhasznú tevékenység ráfordításai</i> | 78 244 | 51 061 |
| Anyagjellegű ráfordítások | 59 344 | 35 568 |
| Személyi jellegű ráfordítások | 17 329 | 14 034 |
| Értékcsökkenési leírás | 658 | 576 |
| Egyéb ráfordítások | 1 012 | 883 |
| <i>E. Vállalkozási tevékenység ráfordításai</i> | 0 | 0 |
| <i>F. Összes ráfordítás (D+E)</i> | 78 244 | 51 061 |
| <i>G. Adózás előtti eredménye (B-E)</i> | 0 | 0 |
| <i>I. Tárgyévi vállalkozási eredmény (G-H)</i> | 0 | 0 |
| <i>J. Tárgyévi közhasznú eredmény (A-D)</i> | 99 | -418 |

lyi, megyei, adott esetben több megyére is kiterjedő, vagy akár országos részvételű fizikaversenyeket. Ezek részletes felsorolása helyett csak meg kívánjuk említeni, hogy a 2007-ben szervezett és lebonyolított, adott esetben több száz főt is megmozgató versenyek száma változatlanul meghaladja a húszat. Ezek között számos olyan is szerepel, amelyek hosszabb idő óta évente rendszeresen kerülnek megrendezésre.

A Társulat 2007-ben is megrendezte hagyományos, országos jellegű fizikaversenyeit (Ötvös-verseny, Ortvay-verseny, Mikola-verseny, Öveges-verseny, Szilárd Leó Fizikaverseny). A korábbi évekhez hasonlóan 2007-ben is a Társulat szervezte meg a résztvevők kiválasztását és a magyar csapat felkészítését az évenkénti fizikai diákolimpiára.

A területi csoportok ismeretterjesztő rendezvényei közül kiemelendőnek tartjuk

- a Baranya megyei csoport *Kis esti fizika* című, hagyományos előadásorozatát;

- a Fejér megyei csoport ismeretterjesztő előadásait;

- a Hajdú megyei csoport által 28. alkalommal megrendezett debreceni Fizikusnapokat;

- a Békés megyei csoport *Játsszunk fizikát!* című interaktív kiállítását.

A továbbképzésben, szakmai ismeretterjesztésben és az információszolgáltatásban betöltött szerepe mellett a tehetséggondozás feladatait is szolgálja a Társulat folyóirat-kiadási tevékenysége. A Társulat 2007-

ben kiadta a Társulat havonta megjelenő hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 57. évfolyamának 12 számát. A Társulat tagjainak tagsági jogon járó *Fizikai Szemle* megtartotta elismert szakmai színvonalát, változatlanul a magyarul beszélő fizikustársadalom egyik igen jelentős összefogó erejének tekinthető. A *Középiszkolai Matematikai és Fizikai Lapok* kiadását 2007. január 1-jétől a MATFUND Alapítvány vette át, de a lap tulajdonosok egyikeként a Társulat továbbra is közreműködik a lap megjelentetésében.

Az *euroatlanti integráció elősegítése* szolgálatában állt a Társulat nemzetközi tevékenysége, amellyel a hazai fizika nemzetközi integrálódásának folyamatát kívántuk erősíteni. Az Európai Fizikai Társulat (EPS) alapító tagegyesületeként a Társulat választott képviselői útján is tevékeny részt vett az EPS munkájában, képviseltette magát az EPS felkérésére az Lengyel Fizikai Társulat által megrendezett konzultációs fórumon.

Kulturális örökség megővése: Eötvös Loránd emléktábla és síremlék koszorúzása; Teller Ede emléktábla-avatás, Tisza László emléktábla-állítás és avatás.

A kutatás területén elért eredmények elismerésére a Társulat 2007-ben is odaítélte tudományos díjait, amelyek közül a Gombás Pál-díj (*Kiss Zsolt*), a Jánossy Lajos-díj (*Jánossi Imre*), a Selényi Pál-díj (*Kőszegi László*), a Budó Ágoston-díj (*Nánai László*), a Bozóki László-díj (*Rónaky József*), a Felsőoktatási díj (*Gnädig Péter*), valamint a Társulat Plakettje (*Hajdú Györgyné* és *Lakatos Tibor*) került kiadásra. A Társulat Küldöttközgyűlése a 2007. évi Prométeusz-éremet *Hraskó Pé-*



Fotó: Kármán Tamás

Szavaz a Közgyűlés

ternek ítélte oda. Az általános és középiskolai tanároknak adományozható Mikola Sándor-díjat 2007-ben *Farkas László* középiskolai tanár és *Varga István* általános iskolai tanár kapta.

Ericsson-díjak kaptak 2007-ben: *Hóbor Sándor*, *Mező Tamás*, *Ádám Árpád*, *Ambrózy Béla*, *Nagyné Lakos Mária* és *Horváthné Fazekas Erika*.

Az Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért Rátz Tanár Úr Életműdíjat *Plósz Katalin* és *Légrádi Imre* kapta.



A fenti Közhasznúsági jelentést az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttközgyűlése 2008. május hó 31-én tartott ülésén fogadta el.

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Mi robbanhatott az NGC 6946-ban?

A szupernóvák vizsgálata több ok miatt is a csillagászati kutatások frontvonalába tartozik. Míg korábban a csillagok belső szerkezetének és fejlődésének feltárásában és megértésében betöltött szerepük miatt érdekelték különösen a csillagászokat ezek az objektumok, újabban az Ia típusú szupernóvák megfigyeléséből levont azon következtetés teszi ezeket a csillagrobbanásokat különösen fontossá, amely szerint az Univerzum gyorsulva tágul.

Napjaink megfigyelési technikájának köszönhetően rohamosan szaporodnak a szupernóva-felfedezések: ma már több ezer szupernóvát tartanak nyilván. Szinte természetes, hogy ebben a hatalmasra duzzadt mintában időnként egészen furcsa viselkedésű szupernóvát is találnak.

Idén februárban például a tőlünk 17 millió fényévre levő NGC 6946 galaxisban figyeltek fel egy csillagrobbanásra, amely szupernóvaként az SN 2008S jelölést kapta. Viszonylag közeli objektumról lévén szó, próbálták kideríteni, hogy milyen volt a csillag viselkedése a látványos felfénylést megelőzően. A jelenle-

gi legkorszerűbb optikai óriástávcső, az arizonai LBT (Large Binocular Telescope) képalkotó kamerájával erről a galaxisról készült korábbi felvételeken azonban nyoma sincs csillagnak az adott helyen, pedig egy nagy tömegű csillag szupernóvává válásakor látványos szülőcsillagnak egy ilyen közeli extragalaxisban.

Viszont a Spitzer-űrobszervatórium archívumának adatait elemezve az SN 2008S helyén kompakt forrást találtak a közeli- és közép-infravörös hullámhossztartományban (lásd a képet a hátsó borítón). Ez a forrás egy csillagot körülvevő, 440 K hőmérsékletű porburrok sugárzásaként értelmezhető az infravörösben észlelt energiaeloszlás alapján.

Figyelembe véve azt a tényt is, hogy a burkok belsejében levő csillag az optikai tartományban egyáltalán nem látszik, arra következtettek, hogy a felrobbant csillag tömege alig tízszerese volt a Napének, vagyis legalább háromszor kisebb tömegű, mint azoké a csillagoké, amelyeknél magkollapszus hatására következik be szupernóva-robbanás. Az elméleti modellek

szerint a 10 naptömegnyi anyagot tartalmazó csillag pusztulása nem jár szupernóva-robbanással.

A felfedezést még érdekesebbé teszi az a körülmény, hogy 2008 májusában egy teljesen hasonló viselkedésű objektumot találtak egy másik extragalaxisban is, a még közelebbi, mindössze 7 millió fényévre levő NGC 300-

ban. Ez esetben sincs látható nyoma a csillag kitörés előtti állapotának. Úgy tűnik, hogy eddig ismeretlen kataklizmikus jelenségre bukkantak a csillagászok, ráadásul néhány hónap leforgása alatt kétszer is.

(a www.spitzer.caltech.edu és az *Astrophys. J. Letters* 681, L9 nyomán)

A szupernóvák utáni vadászat során furcsa égitesteket találtak

A csillagászok, akik távoli szupernóvákat kutattak fel, két véletlenül viszonylag közeli objektumra bukkantak, amelyek a Naprendszer korai szerkezetére vonatkozóan szolgáltathatnak információt. Az egyik az Uránusz és a Neptunusz között majdnem kör alakú pályán mozog, míg a másodikat egy sokkal távolabbi, ferde pályára dobott ki egy bolygó, amely sokkal korábban fogódhatott be a Naprendszerbe. A szupernóva-kutatásokban halvány fényű objektumokban beálló változásokat keresnek. Sok halvány fényforrás azonban hirtelen az égbolt más helyén tűnik fel. Sok kutató nem foglalkozik ezekkel a közeli objektumokkal. *Andrew Becker*, a University of Washington csillagásza azonban érdekesnek találta ezeket is. A diák-

jaival végzett részletes vizsgálatokban 14 000 aszteroidát találtak a belső Naprendszerben, ezek közül 1300 eddig ismeretlen volt.

Az egyik érdekes objektum a 2003UC414 jelű, amely nagyjából 100 km átmérőjű és majdnem körpályán kering a Neptunusz és az Uránusz közötti távolság középpontjához közel. A másik érdekes objektum a 2004VN112 jelű, amely 300 km átmérőjű, pályasíkja 25°-t zár be Naprendszer síkjával és pályája rendkívül elnyúlt, a Nap–Neptunusz távolság 1,5–30-szorosa (47–600 csillagászati egység) közötti értékekkel. A feltevések szerint egy, a Naprendszerből később kiszakadó bolygó kényszerítette erre a szokatlan pályára.

(<http://space.newscientist.com/>)

Új kísérleti adatok négy kvarkból álló mezon létezésére utalnak

A japán Tsukuba székhelyű KEKB elektron–pozitron ütköztetőjénél a Belle együttműködés keretében nyert kísérleti adatok meggyőző bizonyítékot szolgáltatottak arra, hogy létezik egy olyan egzotikus mezon, amely nem csupán egyetlen kvark–antikvark párból áll. A $Z^+(4430)$ jelű mezon töltéssel rendelkezik, és tömege 4,43 GeV, azaz a proton tömeg mintegy négy és fél-szerese. A megfigyelésnél segítséget jelentett az új mezon bomlásának vizsgálata. A Belle együttműködés által 1999 óta összegyűjtött több milliárd e^+e^- ütközés közül *Soo-Kyung Choi* és *Stephen Olsen* kiásott egy 170 eseményből álló csúcst, amely a mezonnak

π^+ és ψ' részecskékre való bomlásának felel meg. A 3,69 GeV tömegű, elektromosan semleges ψ' a már jól ismert *charmonium* mezon, azaz a bájos kvarknak (c) és antirészecskéjének (c^+) kötött állapota.

A Belle-együttműködés meghatározta, hogy a $Z^+(4430)$ jel, amelyet több mint 700 milliárd bomlásnál kerestek, statisztikusan szignifikáns. Így a Z^+ létezésére vonatkozó bizonyíték sokkal meggyőzőbb, mint a 2003-ban talált kétes értékű, de akkor ünnepezt bizonyíték a ma már diszkreditált $\Theta^+(1530)$ exotikus barion esetében, amelyet akkoriban pentakvarknak tartottak.

(www.physicstoday.org)

Aggodalmak a fegyverlaboratóriumok elbocsátott munkatársai miatt

A csökkentett költségvetés, valamint a növekvő költségek miatt a Lawrence Livermore National Laboratory május 22–23-án 440 munkatársát bocsátotta el. Az elmúlt két és fél évben a mintegy 8000 fős személyzetből 1800 főnek mondtak fel. A legutóbb elbocsátott munkatársak közül 60 mérnök, 30 fizikus és 15 vegyész. Nagy részük az atomfegyverekkel kapcsolatos munkát

végzett, és valamennyien legalább 20 éve dolgoztak a laboratóriumban. A törvényhozók egy része veszélyesnek tartja ilyen mértékű felhalmozott tudásanyag elvesztését, és attól tartanak, hogy ezek a magasan képzett specialisták külföldi kormányoknak, köztük ellenséges szándékúaknak, ajánlhatják fel szolgálataikat.

(www.physicstoday.org)

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



nka
Nemzeti Kulturális Alap

mym
paksi atomerőmű

NCA
Nemzeti Civil Alapprogram



A tőlünk csupán 17 millió fényévre elhelyezkedő NGC 6946 spirálgalaxis a Spitzer-űrtávcsővel 2005-ben készített hamisszínes felvételen. A kereszt a 2008 februárjában észlelt SN 2008S szupernóva robbanásának helyét mutatja. A jelenség különlegessége, hogy az objektum a felfénylésig a látható tartományban nem, csak az infravörösben volt látható.

