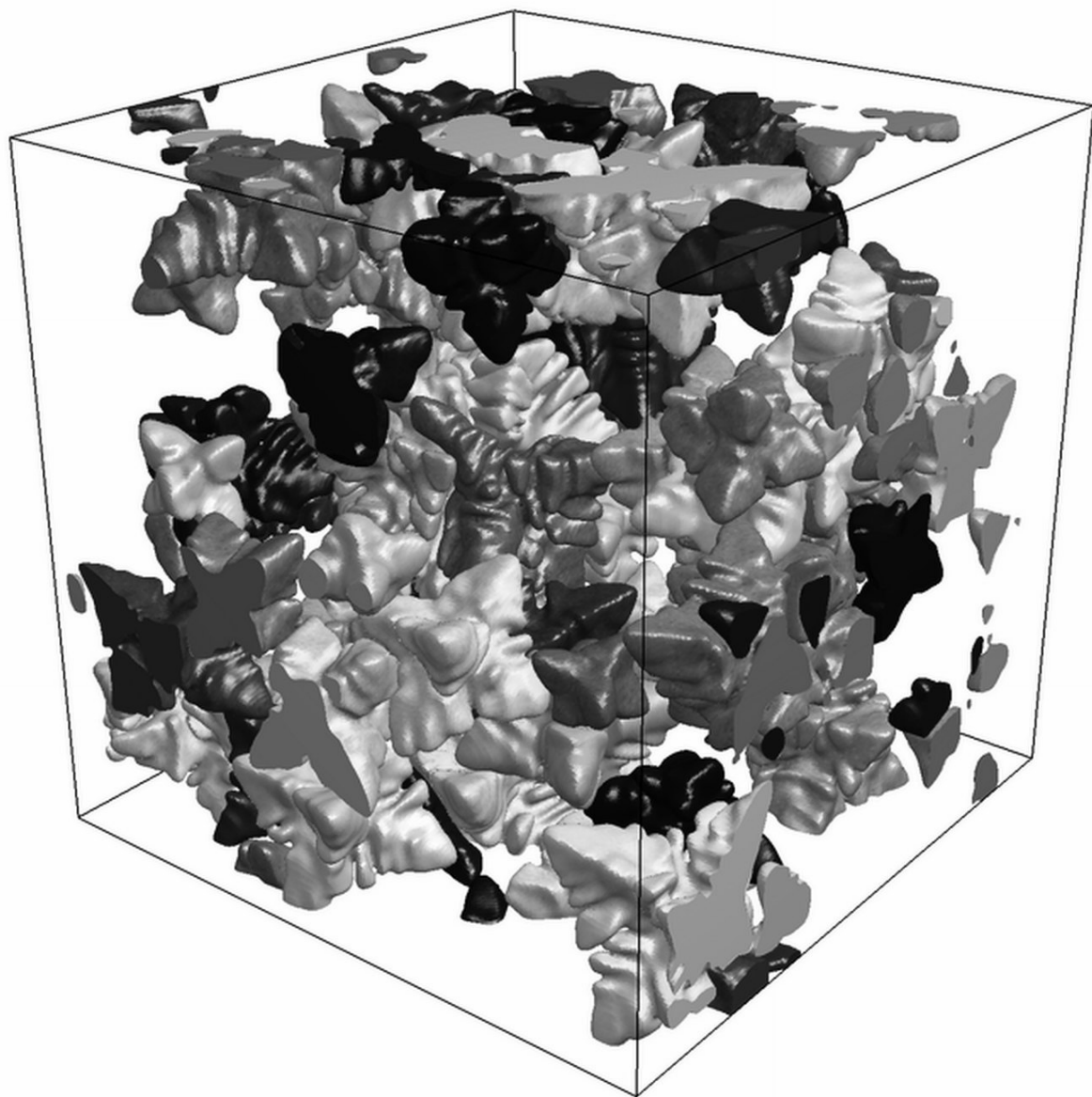


fizikai szemle



2006/12

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

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:

Polidendrites megszilárdulás Ni–Cu
rendszerben:
Fázismező elméleti szimuláció
640×640×640-es rácson (~262 millió
pontban), mely anizotróp fázismező-
mobilitással és a köbös
kristályszimmetriák figyelembe
vételével készült. A megszilárdulás
végére körülbelül 200 véletlen
orientációjú dendrites kristályszemcse
képződik. Jelenleg ez a legnagyobb
ilyen típusú szimuláció a világon
(MTA SZFKI). 80 db fűrtbe kapcsolt
személyi számítógépen körülbelül
1 hónapig tartott a számolás.

TARTALOM

<i>Fodor Zoltán, Katz Sándor: Volt-e (van-e) fázisátmenet a Big Bang (Little Bang) során?</i>	393
Részecskefizika, ami a Nature szerkesztőit is felvillanyozta! (<i>Patkós András</i>)	397
<i>Csizmadia Szilárd: A Plútó osztályozásáról</i>	399
<i>Szabó M. Gyula: Nagy égboltnézetek a csillagászatban</i>	403
<i>Farkas Győző: Attosekundum időtartamú fényimpulzusok</i>	408
<i>Pusztai Tamás, Bortel Gábor, Tóth Gyula, Gránásy László: Komplex kristálmorfológiák modellezése három dimenzióban</i>	412
Nagy Károly 80 éves! (<i>Csikor Ferenc</i>)	416
60 év a fizika bővületében – 75 éves lenne Zimányi József (<i>Lévai Péter</i>)	416

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Görbe László, Nyerges Gyula, Sebestyén Zoltán, Simon Péter, Ujvári Sándor: Fizikai mérések útközben</i>	420
<i>Radnóti Katalin: Első éves BSc hallgatók fizikatudása</i>	424

KÖNYVESPOLC

PÁLYÁZATOK	428
-------------------	-----

HÍREK – ESEMÉNYEK

Melléklet: A Fizikai Szemle LVI. évfolyamának tartalomjegyzéke	430
--	-----

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

Membrán nanocsövek (<i>Derényi Imre</i>)	430
--	-----

Z. Fodor, S. Katz: Did (does) a phase transition occur in the course of the Big Bang (Little Bang)?

Particle physics that thrilled the editors of *Nature* (*A. Patkós*)

Sz. Csizmadia: The rating of (planet?) Pluto

M.Gy. Szabó: Large scale sky surveys

Gy. Farkas: Attosecond light pulses

T. Pusztai, G. Bortel, Gy. Tóth, L. Gránásy: 3D modelling of complex crystal morphologies

Commemorating Academician K. Nagy's 80th birthday (*F. Csikor*)

For 60 years an addict to Physics – J. Zimányi (*P. Lévai*)

TEACHING PHYSICS

L. Görbe, Gy. Nyerges, Z. Sebestyén, P. Simon, S. Ujvári: Physical measurements on the road

K. Radnóti: What amount of knowledge in physics do BSc freshmen show?

BOOKS, TENDERS, EVENTS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Membrane nanotubes (*J. Derényi*)

Z. Fodor, S. Katz: Gab es (gibt es) einen Phasenübergang im Verlauf des Big Bang (Little Bang)?

Elementarteilchenphysik, die auch die Herausgeber der „*Nature*“ aufhorchen ließ (*A. Patkós*)

Sz. Csizmadia: Die Klassifizierung des (Planeten?) Pluto

M.Gy. Szabó: Große Himmelskataloge in der Astronomie

Gy. Farkas: Attosekunden-Lichtimpulse

T. Pusztai, G. Bortel, Gy. Tóth, L. Gránásy: Dreidimensionale Modelle komplexer

Kristallmorphologien

Akademie-Mitglied K. Nagy zum 80 Geburtstag (*F. Csikor*)

60 Jahre hindurch der Physik verpflichtet – J. Zimányi (*P. Lévai*)

PHYSIKUNTERRICHT

L. Görbe, Gy. Nyerges, Z. Sebestyén, P. Simon, S. Ujvári: Physikalische Messungen unterwegs

K. Radnóti: Die Kenntnisse in Physik unserer Studenten des ersten BSc Jahrgangs

BÜCHER, AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Membran-Nanoröhren (*J. Derényi*)

З. Фодор, Ш. Кау: Произошёл ли (происходит ли) фазовый переход в течении Big Bang (Little Bang)

Физика элементарных частиц, вызвавшая внимание редколлегии журнала *Nature* (*A. Паткóу*)

С. Чизмáдия: О классификации (планеты?) Плутона

М.Д. Сабó: Великие обзоры неба в астрономии

Д. Фаркаш: Аттосекундные световые импульсы

Т. Пушту, Г. Бортел, Д. Тот, Л. Гранаш: Трёхмерное моделирование

комплексных кристаллических структур

Академику К. Надь 80 лет (*Ф. Чикор*)

60 лет очарован физикой – Й. Зимани (*П. Левáи*)

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Л. Гёрбе, Д. Нергес, З. Шебестень, П. Штишон, Ш. Уйвари: Физические измерения «по пути»

К. Раднóти: Физические знания наших студентов первого курса

КНИГИ, ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Мембранные нанотрубки (*И. Дерéни*)

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

12. szám

2006. december

VOLT-E (VAN-E) FÁZISÁTMENET A BIG BANG (LITTLE BANG) SORÁN?

Fodor Zoltán, Katz Sándor
ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék

Általában nem vitatott nézet, hogy a legalapvetőbb fizikai elmélet az elemi részek fizikája. A részecskefizikusok a természet legkisebb építőköveit keresik, azok tulajdonságait kívánják megérteni, és bíznak abban, hogy az ezekből felépülő bonyolultabb rendszerek leírásához is el lehet majd jutni. A megismerés során a kísérletek és az elméleti vizsgálatok szoros kölcsönhatásban – és egymásrautaltságban – haladnak. A kísérletek által felfedezett részecskéket és kölcsönhatásokat az elméleti fizikusok foglalják egységes képbe, a kikristályosodó alapvető egyenleteket is ők oldják meg. A kísérletek alapja legtöbbször részecskék ütköztetése részecskegyorsítóban. Ilyenkor néhány nagyenergiás részecske vesz részt a vizsgált folyamatban. Sokkal több nagyenergiás elemi részecskével találkozhatunk például a korai Világegyetemben (Big Bang, „Nagy Bumm”, az angol nyelvtől elszakadva „Ösrobbanás”), vagy az azt legközelebből utánzó földi kísérletekben a nehézionok ütközése során (Little Bang, „Kis Bumm”).

Igen fontos, alapvető kérdés, hogy volt-e, van-e – az erős kölcsönhatás miatt fellépő – „fázisátmenet” a Big Bang és a Little Bang során. Erre a kérdésre keresett és talált egy nagy visszhangot keltett választ kutatócsoportunk (*Yasumichi Aoki, Endrődi Gergely, Fodor Zoltán, Katz Sándor és Szabó Kálmán*). Az eredmény a sokak által a világ legrangosabb tudományos folyóiratának tartott *Nature*-ben jelent meg ez év októberében, melyhez ugyanazon folyóiratszámában a 2004. évi fizikai Nobel-díjas, *Frank Wilczek* írt egy figyelemfelkeltő kísérőcikket.

Az erős kölcsönhatást mai tudásunk szerint leíró fizikai elmélet a kvantum-színdinamika. A kvantum-színdinamikai kölcsönhatás rendkívül erős. Egy „legyengített”, leánykolt fajtája felel a magerőkért, azok „hétköznapi” megnyilvánulásaiért: az atombomba pusztító erejéért és a Napban felszabaduló óriási energiáért.

Az elektromágneses kölcsönhatáshoz hasonlóan itt is töltések játsszák a fő szerepet. Amíg azonban elektromos

töltés csak egyetlen fajta van (amely, persze, lehet pozitív vagy negatív), a kvantum-színdinamikában többfajta töltés is szerepel (ezek mindegyike is lehet pozitív vagy negatív). Érdekes módon nemcsak az azonos fajtájú, egyenlő mennyiségű pozitív és negatív töltések keveréke eredményez semleges rendszert, hanem több, különböző fajtájú töltés megfelelő arányú vegyítése is. Ez emlékeztet a színek elméletére: a három alapszín keveréke fehér, azaz „semleges” színt eredményez. Ezen analógia miatt szokás az erős kölcsönhatás elméletét kvantum-színdinamikának (kvantum-kromodinamikának) hívni. Az elektrodinamikai töltést hordozó elektron kvantum-színdinamikai analogonjainak – három van belőlük, kvarkoknak hívjuk őket – három különböző töltését színtöltésnek, sőt, gyakran piros, zöld és kék színtöltésnek nevezzük. Természetesen a gondolatmeneteinkben említett színtöltéseknek semmi közük sincs a valódi színekhez, az elnevezés pusztán a mondott analógián alapul.

Az erős kölcsönhatás – ahogy már említettük – „rendkívül erős”. Álló töltéseinek szétválasztásakor, azaz két kvark eltávolításakor, az elektromosságban szokásos $1/r$ típusú, a távolsággal csökkenő potenciál helyett egy minden határon túl növekvő lineáris potenciál jelenik meg. Ez azt is jelenti, hogy színtöltéseket közönséges körülmények között nem lehet (makroszkopikus távolságra) szétválasztani. Egy ilyen szétválasztáshoz a potenciál legyőzésére, óriási energiára volna szükség. Ezzel függ össze, hogy a természetben csak zérus színtöltésű részecskéket detektálhatunk. Ez megvalósulhat például úgy, hogy egy összetett részecskében egy adott színtöltés pozitív és negatív járuléka kioltják egymást. Az ilyen részecskéket legegyszerűbben egy kvark (pozitív színtöltésű részecske) és egy anti-kvark (negatív színtöltésű részecske) kötött állapotként értelmezzük, és mezonoknak hívjuk (például π - vagy K-mezonok). A másik lehetőség az, hogy a három színt egyforma arányban keverjük. Az ilyen részecskéket három, különböző színtöltésű kvark (vagy három antikvark)

kötött állapotaként értelmezzük, és barionoknak hívjuk (ilyen például a proton vagy neutron). Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az erős kölcsönhatás erőssége, a statikus kvarkok között ható lineáris potenciál minden határon túli növekedése felel azért, hogy a protonokban található három kvark bezáródott. A szokásos anyag (protonok, neutronok) az úgynevezett bezáró (angolul confined) vagy más néven hadronikus fázisban található.

Ahogy láttuk, közösleges körülmények között nem nyílik lehetőség szabad kvarkok észlelésére. A már említett F. Wilczek, valamint D.J. Gross és H.D. Politzer azt ismerték fel, hogy az energia növekedésével az erős kölcsönhatás egyre „gyengül”. Ezért a felismerésért kaptak 2004-ben Nobel-díjat. A lineárisan növekvő potenciál statikus kvarkok esetén maradéktalanul érvényesülő bezáró hatásával szemben az egyre magasabb hőmérsékleteken fellépő egyre nagyobb energiák a kölcsönhatás gyengüléséhez vezetnek, a színtöltések egyre jobban eltávolodhatnak egymástól, mígnem ezt az eltávolodást már nem is a visszahúzó potenciál, hanem a rendszerben lévő többi részecske, az azokon való szóródás, az azokkal történő ütközés korlátozza. Ilyen állapotban a színtöltött részecskék lényegében már nem is érzik a bezárást. Egy új fázis jelenik meg, melyet felszabadító (angolul deconfined) fázisnak nevezünk.

A bezáró és a felszabadító fázisok között rendkívül lényeges különbségek vannak. Alacsony hőmérsékleten – a bezáró fázisban – csak semleges színtöltésű részecskéket találunk, a kvarkok közötti potenciál minden határon túl nő, és az ilyen állapotban (fázisban) levő kölcsönható gáz mindössze néhány szabadsági fokkal rendelkezik. Magas hőmérsékleten – a felszabadító fázisban – a domináns részecskék színtöltöttek, a potenciál nem bezáró, és az ilyen állapotban (fázisban) levő kölcsönható gáz sok tucat szabadsági fokkal rendelkezik. Az állapot jellegét meghatározó külső feltételek, például a hőmérséklet változtatását kísérő – ennyire jelentősen eltérő állapotok közötti – állapotváltozás során általában jellegzetes fázisátmenetet szoktunk észlelni.

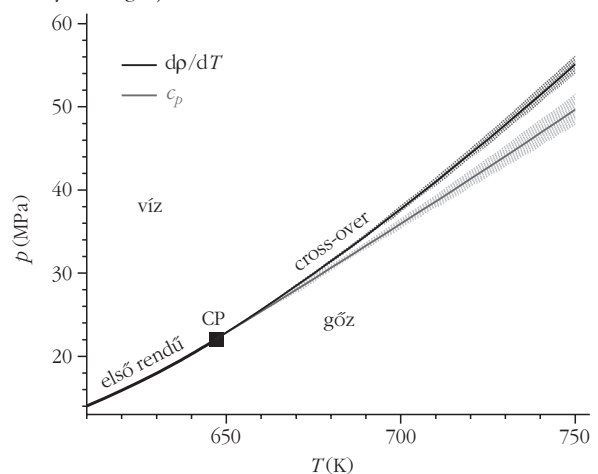
Közismert fázisátmenet például a víz és a gőz közötti átmenet, melyet a hőmérséklet–nyomás, (T, p) , diagramon az 1. ábra illusztrál. (Az ilyen típusú diagramokat fázisdiagramnak szokás nevezni, mert egy anyag különböző fázisait jelzi a külső paraméterek függvényében.) Amint az ábra mutatja, alacsony hőmérsékleten a rendszer a vízfázisban található. Viszonylag kis nyomáson, a rendszert felmelegítve egy úgynevezett elsőrendű víz–gőz fázisátmenetet észlelünk. Az elsőrendű fázisátmenetek tipikusan nem folytonosak, nem analitikusak. A víz–gőz fázisátmenet során a sűrűség nem folytonosan változik, hanem ugrik (légköri nyomáson az 1 gramm/köbcentiméter értékről egy nagyságrendekkel kisebb értékre), illetve a fajhő végtelenné válik (a látens hőt közölni kell a rendszerrel még mielőtt annak hőmérséklete akár a legkisebb mértékben is változna). Ezt az elsőrendű fázisátmeneti tartományt folytonos vonal mutatja. Érdeemes megjegyezni, hogy szennyezésmentes esetben és gyors hőmérsékletváltozás mellett az elsőrendű fázisátmeneteket túlhűlés vagy túlmelegedés jellemzi. Például a gőzfázis a kritikus hőmérséklet alá hűl, majd rendkívül gyors-

an vízcseppek jelennek meg. Ezen cseppek növekedése viszi át a rendszert az egyik fázisból a másikba. (A fordított irányú átmenet során lehetséges túlmelegedés jelensége, ismert módon, felléphet víz mikrohullámú sütőben történő melegítésekor.)

A fázisdiagram egyik legérdekesebb tulajdonsága a kritikus „végpont” megjelenése. A víz 374 Celsius fokon és 0,32 kg/l sűrűsége opálóssá válik, makroszkopikus méretű korrelációk alakulnak ki. Érdeemes megjegyezni, hogy ez az állapot akár egy gázláng segítségével is megvalósítható (bár a fellépő nagy nyomás miatt meglehetősen erős tartályra van szükség). Ebben a kritikus végpontban másodrendű fázisátmenetet észlelünk. Itt a változások folytonosak, de nem analitikusak. A rendszer kritikus tulajdonságokat mutat, például a korrelációs hossz végtelenné válik.

Ha a hőmérséklet–nyomás diagramon még ezeknél az értékeknél is magasabb (T, p) értékeket vizsgálunk, akkor egy analitikus átmenetet tapasztalunk (ezt szokás crossover-átmenetnek is nevezni). A víz és a gőz közötti tipikus különbségek részben megmaradnak, az átmenet nem ugrásszerű, hanem folytonos és analitikus. A rendparaméternek tekinthető sűrűség a crossoveren való áthaladáskor is gyorsan változik, de a fázisátmenetekre jellemző szingularitás nem jelenik meg. A sűrűség nem ugrásszerűen, hanem folytonosan változik, de a változásban van egy meredek szakasz, melynek legmeredekebb pontját a víz forráspontjának tekinthetjük. A fajhőnek is van egy maximuma (amely az elsőrendű fázisátmeneti tartománnyal ellentétben már nem végtelen). Az átmeneti hőmérsékletet, a víz forráspontját ezzel a maximummal is definiálhatjuk. Ahogy az 1. ábra mutatja, a két definíció

1. ábra. A víz sematikus fázisdiagramja hőmérséklet (T) nyomás (p) síkon. A fázisvonal azon p - T értékeket jelöli, ahol a két fázis (víz és gőz) tud együtt létezni. Közösleges légköri nyomáson (1 atm.) 100 Celsius fokon, a légköri nyomás felénél 82 fokon. A víz és gőz közötti fázisvonal végét egy kritikus pont jelöli. Ezen p - T értékpárnál a fázisátmenet másodrendű. Ilyen T és p értékek esetén a víz opálóssá válik, a korrelációs hosszak végtelen nagyok lesznek. A jelenséget kritikus opaleszcenciának hívjuk. Ezen kritikus ponthoz tartozó (T, p) értékeknél is nagyobb hőmérsékleten és nyomáson már csak egy analitikus átmenetet tapasztalunk, melynek átmeneti hőmérséklete a vizsgált mennyiségtől függ. Más átmeneti hőmérsékletet ad a fajhő maximuma (alsó, világosabb vonal és a bizonytalanságát jelző sáv), és megint mást a sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltjának maximuma (felső, sötétebb vonal és a bizonytalanságát jelző sáv).



megegyezik az első és másodrendű fázisátmenetek esetén. Az analitikus átmenet (crossover) viszont más forráspontot, átmeneti hőmérsékletet eredményez attól függően, hogy melyik definíciót használjuk.

A víz fázisdiagramja arra a kérdésre mutatja a választ, hogy mi történik a vízzel, ha egyre jobban melegítjük, vagy egyre jobban összenyomjuk. A kérdést a részecskefizikában sokkal általánosabban is feltehetjük. Mi történik a „semmivel”, a vákuummal, ha egyre jobban „melegítjük”?

A vákuum melegítése (energia bepumpálása) azzal jár, hogy tömeggel rendelkező részecskék jelennek meg. Ez az $E = mc^2$ képlet szerinti energia-tömeg ekvivalencia következménye. Természetesen óriási hőmérsékletekre van szükség, hogy az erős kölcsönhatásban részt vevő részecskék a melegítés hatására megjelenjenek a vákuumban. Tipikusan 10^{12} Celsius fok körüli értékre kell gondolnunk. Ha a hőmérsékletet tovább növeljük, akkor egy fázisátmenetet tapasztalunk: a bezárt kvarkok a már leírt módon kiszabadulnak.

Ilyen magas hőmérsékletek uralkodhattak a korai Világegyetemben (Big Bang), annak körülbelül 10 mikroszekundumos korában. Nehézionok ütköztetése révén sikerült ilyen magas hőmérsékleteket földi körülmények között is előállítani. Jelenleg az Egyesült Államok Brookhaven National Laboratory-jának (BNL) Relativisztikus Nehézion Ütköztetője (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) szolgáltatja a legmagasabb hőmérsékleteket. Igaz, ez a magas hőmérséklet csak a másodperc töredékéig áll fenn, a rendszer igen nagy sebességgel kitágul és lehül (Little Bang).

Mit tudunk mondani az erős kölcsönhatás miatt megvalósuló átmenetről? A bezáró és a felszabadító fázis közötti különbség olyan jelentős, hogy évtizedekig meg volt győződve a tudományos közvélemény arról, hogy közöttük egy elsőrendű fázisátmenetnek kell történnie. Egy ilyen, a korai Világegyetemben végbement elsőrendű fázisátmenetet az Univerzum gyors tágulása miatt a már említett túlhűlés jellemez. A hadronikus, bezáró fázis cseppecskéi robbanásszerűen jelennek meg a felszabadító fázisban. Ez máig ható következményekkel járt volna.

Nézzünk néhányat az ilyen jellegű fázisátmenet következményei közül. A cseppecskék vonzó tömegcentrumokat képeznek, a Világegyetem tömegeloszlása ennek következtében megváltozik. Az atommagok képződése is inhomogén módon zajlik le. Egzotikus ritka kvarkokat tartalmazó csomagocskák keletkeznek. Az egymásnak ütköző cseppecskék gravitációs hullámokat keltenek. Kísérleti fizikusok egész generációja kereste ezen jelenségek mai megnyilvánulásait. Sajnos, a kísérletek nem voltak elég érzékenyek, legalábbis néhányan így értékelték azt a tényt, hogy a keresés ezidáig sikertelen maradt. Sokan mások viszont már kezdték feladni az elsőrendű fázisátmenetre vonatkozó képet. Voltak jelek, melyek arra utaltak, hogy talán egy analitikus átmenettel állunk szemben. Egyre többen vallották ezt a nézetet, noha egyértelmű bizonyíték sem ezt, sem az elsőrendű fázisátmenetre vonatkozó elképzelést nem igazolta. A helyzet elméleti bizonyítás szempontjából mindig is nyitott volt, és kísérleti evidencia sem volt, mely az egyik vagy a másik forgatókönyvet támogatta, vagy éppen kizárta volna.

Kutatócsoportunk elméleti számítások alapján megmutatta, hogy az átmenet a nagy nyomású víz átmenetéhez hasonlít, azaz analitikus átmenet, az elsőrendű átmenetekre vonatkozó elképzeléseket el kell vetni. Az Univerzum fejlődését egy folytonos átmenet segítségével kell megértenünk. A víz forrását nap mint nap látjuk, és egy egyszerű hőmérővel ellenőrizhetjük, hogy légköri nyomáson valóban 100 Celsius fokon történik. A víz kritikus pontjának helyét is a kísérletek adták meg, és a kísérletek mondják meg azt is, hogy mely hőmérséklet-nyomás értékek felett kapunk analitikus átmenetet. Elméletileg ezek meghatározása rendkívül nehéz, alapelvekből ezidáig nem is sikerült.

Hogyan lehetséges, hogy a víznél szemmel láthatólag lényegesen egzotikusabb, bonyolultabbnak tűnő kvantum-szindinamikai átmenetet sikerült mégis elméletileg megérteni?

A részecskefizika kölcsönhatásait (a már említett erős kölcsönhatás mellett ilyen a radioaktív béta-bomlásért felelős gyenge kölcsönhatás és az elektronok és fotonok kölcsönhatását leíró kvantum-elektrodinamika) a kvantumtérelméletek írják le. Ezek egyrészt *térelméletek*, azaz a dinamikai változókat, tereket, a geometriai tér pontjaihoz rendeljük. (Analogiát keresve szemléletes példa lehet a meteorológia. A hőmérséklet, nyomás, szélsébség a tér különböző pontjaiban más és más, és időben fejlődik.) A kvantumtérelméletek másik jellemzője, hogy *kvantumelméletek*. A legismertebb kvantumelmélet a kvantummechanika, amelyben a dinamikai változókat, az impulzust és a helyet nem számokkal, hanem egymással fel nem cserélhető operátorokkal jellemezzük. Ennek egyik jól ismert következménye a Heisenberg-féle határozatlansági reláció, valamint az is, hogy, ha a leírt objektum kötött állapot, annak energiája csak egymástól diszkrétül különböző értékeket vehet fel. A kvantumtérelméletek ezen két leírási mód ötvözéséből születtek. A dinamikai változók a terek, melyeket, a meteorológiával ellentétben, már nem számokkal, hanem egymással fel nem cserélhető operátorokkal írunk le. Ez az elmélet is meghatározott, kvantált energiaszintekkel rendelkezik. Az általa leírt objektumokhoz azonban már nemcsak meghatározott energiát rendelhetünk, hanem a térbeli és időbeli változások összekapcsoltsága miatt jól meghatározott (kvantált) impulzust, impulzusmomentumot és részecskeszámot is.

Felmerülhet a gondolat, hogy az elemi részecskéket kvantumtérelméleti objektumokként, mint térkvantumokat írjuk le. Rendkívül meglepő, hogy ezt az elképzelést két – legalábbis távolról nézve – egyszerű feltétellel kiegészítve az elemi részek világának szinte minden jelensége nagy pontossággal leírható. Az egyik feltétel az önellentmondásmentesség (ezt minden végső elméletől természetesen elvárjuk). A másik feltétel, hogy az elmélet alapegyenleteit bizonyos transzformációknak változatlanul kell hagyniuk (szimmetriatranszformációk). A kvantum-elektrodinamikában ez a transzformáció az anyagtereknek egységnyi abszolút értékű komplex számmal való megszorozása. A gyenge kölcsönhatás esetében a szorzás 2×2 -es (speciális unitér) mátrixokkal, az erős kölcsönhatás kvantum-szindinamikai elmélete esetében pedig 3×3 -as (ugyancsak speciális

unitér) mátrixokkal történik. Ezeknek az egyszerű transzformációknak, ha szimmetriatranszformációk, jól meghatározott alakban leírható kölcsönhatások, dinamikai egyenletek felelnek meg. Ezek birtokában, az egyenletek megoldásával, elvileg lehetőség nyílik a megfelelő fizikai rendszer történéseinek leírására, így a kvantum-szindinamikai fázisátmenet közelítésektől mentes leírására is. A gyakorlatban egzakt megoldásokat csak kivételes esetekben sikerül találni, úgyhogy a feladatot még az egyenletekben rejlő információ kikutatására alkalmas közelítő módszer megtalálása, kidolgozása is nehezíti.

A részecskefizikai folyamatok közelítő leírásának egyik legfontosabb módszere a perturbációs számítás, a fokozatos közelítések módszere. Ezen módszer alkalmazásának első lépése az, hogy valamely fizikai mennyiséget közelítőleg kiszámítunk, majd ezt az eredményt a számítás további lépéseiben újra meg újra korrigáljuk. Amennyiben a korrekciók kicsik, és a közelítés során ráadásul még egyre kisebbekké is válnak, a módszer fokozatosan közelíti a végeredményt. A módszer alkalmazhatóságának feltétele – a fizikai probléma terminológiájával élve –, hogy a kölcsönhatás gyenge legyen. Sajnos, az erős kölcsönhatás – „erős”, a fokozatos közelítések módszere, néhány kivétellestől eltekintve, nem alkalmazható.

Alternatívát a rácstérelmélet kínál. Az alapvető rácstérelméleti közelítés abban áll, hogy a teret és időt nem folytonos változóként kezeli, hanem egy ráccsal helyettesíti. (Hasonló rácsot használnak az időjárás-előrejelzés készítése során. Meghatározott földrajzi helyeken és magasságokban mérik a hőmérsékletet, szélirányt, légnyomást, majd az adatok összesítése és persze jelentős számolás után készül el az előrejelzés.) A részecskefizikában az elmélet térerősségeit írjuk a rácspontra. Láttuk, hogy kvantumelméleteket egymással fel nem cserélhető operátorok segítségével fogalmazhatjuk meg. Létezik azonban egy másik (*R. Feynman* Nobel-díjas amerikai fizikus nevéhez fűződő), pályaintegrálos megfogalmazás, amely jobban illeszkedik a rácsformalizmushoz. A kvantummechanikai átmeneti valószínűséget úgy határozzuk meg, hogy minden létező klasszikus pályára összeadjuk az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat (i a képzetes egységgyök, S az adott klasszikus pályához tartozó hatás). A klasszikus fizikában egyetlen pálya valósul meg, és ezt a hatást minimális értéke választja ki. A módszer térelméleti általánosítása abban áll, hogy az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat minden létező térkonfigurációra összegezzük. Mivel az $\exp(iS)$ fázisfaktorok erősen oszcillálnak, összegzésük numerikus módszerekkel nehéz. Ezért a jelenségeket általában imaginárius idő függvényeként vizsgáljuk, mely ekvivalens az $\exp(-S)$ Boltzmann-faktorok összegzésével. Ezen összeg tagjai már nem oszcillálnak, a számítás elvégezhető.

Meteorológiában a jóslatok annál jobbak, minél finomabbak a számításokhoz használt rácsok. Ez azt jelenti, hogy minél több pontban kell megmérnünk a hőmérsékletet, nyomást, szélességet, és ezeket a finom rácsra elvégzett méréseket használjuk a számítások során. A kvantumtérelméleti számítások nagyon hasonlóak. Minél finomabb a rács, annál pontosabb az eredmény. Numerikus számítások esetén a végtelen finomságú rácsot extrapolációval szoktuk elérni. Egyre finomabb és finomabb

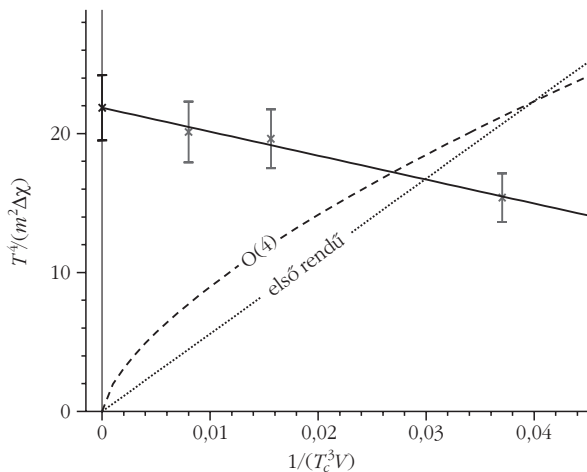
rácsokat használunk, majd az eredményeket, a rácsállandótól való függésük aszimptotikus alakjának ismeretében, a végtelen finom, azaz nulla rácsállandóhoz extrapoláljuk (kontinuum határeset).

Az egyes jelenségeket az állapotösszeg numerikus meghatározásának a révén, nagy számítógépekkel számítottuk ki. Manapság 10 milliárd dimenziós integrálokat számolunk. Másodperceként ezer milliárd műveletre van szükség, amely szuperszámítógépeknek való feladat.

A 21. század elejének emblematikus szuperszámítógépe volt például a japán Earth Simulator, Föld-számoló. Másodpercenként sok ezer milliárd műveletet végez, de, sajnos, az ára is a milliárd dollár nagyságrendjébe esik. Számunkra ez az irány nem volt járható. Ezért az ELTE-n kifejlesztettünk egy szuperszámítógépet, mely a részecskefizikai felhasználásokban versenyképes a japán géppel, de annak töredékébe kerül. Ez amiatt van, hogy mi személyi számítógépekből építkezünk, és nem készen veszünk a szuperszámítógépet. A személyi számítógépek a számítási képességeikhez képest – óriási piacuk miatt – nagyon olcsók. A hétköznapi életben a számítógépipar egyik húzóereje a számítógépes játékok iránti igény. E játékok megvalósítása során a háttérben olyan műveleti struktúrát használnak fel, amely matematikai értelemben nagyon hasonló (szakkifejezéssel: azzal lokálisan izomorf) a standard részecskefizikai elmélet egyik szimmetriatranszformációjához. Ameddig a személyi számítógépek gyártói arra törekednek, hogy a játékprogramok minél gyorsabban fussanak, és ennek megfelelően huzalozzák be a processzorokat, addig az ezeket felhasználó részecskefizikai számítások is egyre gyorsabbak lesznek. Persze, a programozás terén el kell menni a megfelelő szintig.

Miután az erős kölcsönhatás elméleti hátterét megértettük, és rendelkezünk a megfelelő számítógépes kapacitással, hozzákezdhetünk az eredeti kérdésünk megválaszolásához, nevezetesen, el kell döntenünk, hogy az erős kölcsönhatás magas hőmérsékletű átmenete elsődrendű fázisátmenet volt vagy egy analitikus crossover. A fázisátmenetekkel kapcsolatos kérdések vizsgálatához az úgynevezett véges méret skálázást szokás használni. A fázisátmenetekre jellemző szinguláris viselkedés csak végtelen térfogatú rendszerekben jelentkezik. Véges térfogaton semmilyen szingularitást nem látunk. A fajhő nem válik végtelenné (bár értéke elég nagy lesz), a víz sűrűsége nem ugrik (bár igen gyorsan változik). Az analitikus, crossover típusú átmenetekre viszont eredendően az ilyen gyors, de szingularitástól mentes változás jellemző mind véges, mind végtelen térfogaton. Hogyan tudunk akkor különbséget tenni véges térfogaton vagy térfogaton egy valódi fázisátmenet és egy analitikus, crossover típusú átmenet között? Erre a célra dolgozták ki a véges-méret-skálázás elméletét.

Egy valódi elsődrendű fázisátmenet esetén a fajhő (az átmeneti hőmérsékleten) a térfogat növelésekor a térfogattal arányosan, minden határon túl nő. A víz példájánál maradván: a sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltja, bár nem végtelen (a sűrűség nem ugrik), de a rendszer méretének növelésével, ugyancsak a térfogattal arányosan divergál. A másodrendű fázisátmenetek hasonlóan viselkednek. Az említett fizikai mennyiségek a térfogat növelésé-



2. ábra. Az erős kölcsönhatás egyik (a víz fajhőjéhez hasonló) fizikai mennyiségének vizsgálata. A hőmérséklet függvényében a maximumot kerestük. A három pont a három különböző térfogaton kapott eredményt, illetve azok hibáját mutatja. A folytonos vonal jelzi a végtelen térfogati extrapolációt. A pontozott, illetve szaggatott vonal jelzi a várt viselkedést elsőrendű és másodrendű fázisátmenet esetén. A számítások teljesen más, analitikus átmenetre jellemző térfogatfüggést mutatnak.

vel a másodrendű fázisátmenet esetében is divergálnak. A legfontosabb különbség az, hogy ez a minden határon túl történő növekedés nem a térfogattal, hanem annak valamilyen, általában egynél kisebb, hatványával történik. A divergencia megjelenik, de enyhébb formában. Analitikus, crossover típusú átmenet esetén a kép teljesen más. A megfelelő fizikai mennyiségek nem nőnek a térfogat növelése során. Enyhe térfogatfüggést kell tapasztalnunk, mely nagy térfogatokra fokozatosan eltűnik.

Számításaink során egy, a sűrűség deriváltjához hasonló mennyiség hőmérsékletfüggését határoztuk meg három különböző térfogaton és négy különböző térbeli felbontás, rácsállandó mellett. (A konkrét mennyiség, amelyet vizsgáltunk, a kvarkterek kondenzátuma, mely a sűrűséggel analóg, illetve ezen kondenzátum hőmérséklet szerinti deriváltja volt. Elsőrendű fázisátmenet esetén a kondenzátum értéke ugrana, a kondenzátum hőmérséklet szerinti deriváltja pedig végtelenné válna.) A tipi-

kus térbeli felbontás a meteorológiai felbontásokhoz képest meglehetősen kicsiny $0,000\,000\,000\,000\,001$ cm. A négy különböző felbontást használva mindhárom térfogaton meghatároztuk a fenti fizikai mennyiség hőmérsékletfüggéséhez tartozó maximumot. Ez a három különböző térfogaton három különböző eredmény. A kérdés, hogy ez a három eredmény a fázisátmenetekre jellemző térfogatfüggést mutatja-e vagy sem. A 2. ábra illusztrálja a végeredményt. A sűrűség hőmérséklet szerinti deriváltjához hasonló mennyiség inverzét ábrázoljuk a térfogat inverzének a függvényében. (Az egyszerűbb ábrázolás kedvéért mindkét mennyiséget dimenziótlantítottuk a hőmérséklet és a kvarktömeg segítségével.) A három térfogathoz tartozó eredményt, valamint azok hibáját az ábra pontjai mutatják. A végtelen térfogati határesetet a függőleges tengely közvetlen környezete jelzi (hiszen a térfogat inverzének függvényében ábrázoltuk az eredményt). Valódi fázisátmenet esetén a vizsgált mennyiség a térfogat növelésekor minden határon túl nőne, azaz az inverze nullához tartana. Ez azt jelenti, hogy a három pontnak az origóhoz kellene tartania. A két vonal jelzi, hogy ez hogyan valósulna meg első-, illetve másodrendű fázisátmenet esetén. Ahogy látható, az eredmények egyáltalán nem ezt a fajta viselkedést mutatják. A térfogat növelésekor a vizsgált mennyiség konstans értékhez tart. Az erős kölcsönhatás átmenetéről így beláttuk, hogy az nem egy valódi szingularitással jellemezhető fázisátmenet, hanem egy analitikus, crossover típusú átmenet.

Összegzőképpen a következőket mondhatjuk. Az erős kölcsönhatás alacsony és magas hőmérsékleti viselkedése jelentősen eltér. A két tartomány közötti átmenetet alapelvek segítségével vizsgálhatjuk. A számítások elvégzéséhez a saját fejlesztésű szuperszámítógépek költségkímélő megoldást jelentettek. Az átmenetről sikerült megmutatni, hogy az nem a víz forrásához hasonló fázisátmenet, hanem egy analitikus, úgynevezett crossover. Az átmenet típusának meghatározása a korai Univerzum (Big Bang) és a jelenleg is folyó nehézionkísérletek (Little Bang) folyamatainak megértése szempontjából volt fontos.

RÉSZECSKEFIZIKA, AMI A NATURE SZERKESZTŐIT IS FELVILLANYOZTA!

Nincs emlékem arról, hogy valaha is megjelent volna egy elméleti részecskefizikai cikk a természettudományos „kutatási divatot” meghatározó hetilapban, a *Nature*-ben. 2006. október közepén megtörtént ez a csoda, sőt, a kiemelkedő érdekességű publikációkat megillető értelmező kommentárt egy Nobel-díjas fizikus írta. A cikket ugyan *Aoki* et al. szerzőmegjelöléssel fogják idézni, ám az ABC-sorrend miatt első helyre került japán kutató kivételével minden szerzője magyar.

Az eredményt és annak hátterét a nevezetes esemény apropóján a *Fizikai Szemle* olvasóinak is bemutató – a

kutatást vezető két kollégánk, *Fodor Zoltán* és *Katz Sándor* által írt – cikk nem igényel további értelmezést. Az én szubjektív megjegyzéseim az elsőrangú eredmény szokatlan publikálási helyválasztásának okát keresgélük.

„A *Nature* – politikai lap” – mondta egy-két éve a véres komolyság arckifejezésével egy kollégám. „Ha a *Nature* azt írja, hogy az emberi aktivitás tíz éven belül visszafordíthatatlanná teszi a globális felmelegedést, akkor egy hét sem kell, hogy a világ vezető politikai napilapjaiban ezt valamiképpen (esetleg szó szerinti fordításban) hírül adják. Ha egy-két hónap vagy év múlva az újság helyt ad va-

lamey ez iránt kételyeket támasztó eredménynek, akkor a szakújságírók kételkedés nélkül ezt az új aktuális igazságot szajkózzák. A tudományközeli értelmiségi publikum szemében a *Nature*-beli megjelenés beszerteli a szóbanforgó tudományos munkát és főleg annak alkotóját.”

Ennek a hatalmas – az előbb kissé szarkasztikusan kommentált – befolyásnak megvan a hatása a kutatókra is. A fizika területén a kvantummechanikai mérés paradox tulajdonságainak kimutatásától a statisztikus fizikai módszernek a biológia és a társadalom jelenségeire való alkalmazásán át a kozmológiáig terjedő skálán az áttörésnek számító eredményeiket általában legalább két változatban írják meg. Egy nagyon összefogott, a technikai eszközöket többé-kevésbé elfedő prezentációt igyekeznek elsőként átjuttatni a *Nature* szerkesztőinek szuperselektív szűrőjén. Ha igazán fontosnak ítéltetik a munka, akkor a szerkesztő a heti lapszám élén álló jegyzetében külön kiemeli, és egy neves kutatót is felkér, hogy kísérelje meg értelmezését az általános természettudományos műveltségű olvasók (elsősorban a tudományos újságírók) számára. Ez a sokrétegű bemutatás biztosítja a széles publicitást a laikusok felé is. Mindezt a Fodor Zoltán vezette kutatócsoport eredménye terven felüli kivitelben, *Frank Wilczek*nek, az erős kölcsönhatás Nobel-díjas kutatójának közreműködésével megkapta.

A hozzáértő szakmabeliek számára készített változatot, amelyet szigorúan szakosodott folyóiratban publikálnak, csak a *Nature* szerkesztői döntését követően nyújtják be. Mint kollégáim mesélték, a cikk elfogadása után, a nyomdai megjelenést megelőzően, a szerzőket a *Nature* közlési moratóriumra kötelezi! Azt azonban senki nem vállalhatja, hogy pusztán a *Nature*-ben tegye közzé munkáját, mert annak alapján aligha lehet a módszert és az eredményt összevetni a versenytársak munkáival. Az eredmény korrektségét pedig a *Nature* sem garantálja. Fodor Zoltán és munkatársai is még kemény „csörtevéltásokra” számíthatnak a konkurens csoportokkal, akiknek tagjai közül a szakirányú folyóirat szerkesztői kiválasztják az időközben beküldött részletes cikkük bírálót.

A *Nature* tematikailag igen válogatós. Csak a szerkesztők által progresszívnek tartott kutatási területekről beérkező kéziratok számíthatnak érdeklődésre. A fent felsoroltak mellett a környezeti fizika, a mezoszkopikus (klasszikus és kvantumos határán mozgó) jelenségek és az úrfizika területéről tudnék csak publikációt felidézni a közelmúltból. A részecskefizika (sem elméleti, sem annak szuperköltséges, gyorsító változata), úgy tűnik, nem tartozik a szerkesztők kedvencei közé.

Fodor Zoltánnak és munkatársainak betörése szerintem két okból bizonyult sikeresnek. Egyrészt igen meggyőzően kapcsolták össze a vizsgált részecskefizikai kérdést a legkorábbi kozmológiával. A másik sikeres „fogás” annak hangsúlyozása volt, hogy cikkük *végleges* választ ad egy több mint negyedszázada folyamatosan kutatót kérdésre: folytonos (az ionizált plazma kialakulásához hasonlatos) vagy szakadásos (a fázisátalakulások valamely osztályába sorolható) volt-e az a kozmikus esemény, amelyben a kvarkok a Világegyetem hűlése során összeálltak mezonokká és barionokká? Érdemes megjegyezni, hogy éppen 25 évvel ezelőtt alkalmazta elsőként *Kuti Gyula, Polónyi*

János és Szlachányi Kornél azt a számítógépes módszert e feladat leegyszerűsített változatára, amelynek folyamatos fejlesztése végén újra magyarok és újra jelentős részben Budapesten végzett kutatómunkával tettek pontot a kutatás egy fontos kérdése mögé.

Fodor Zoltán szereti jól definiálni és egyértelmű végeredményt ígérő feladatkitűzéssel formálni projektjeit. Amikor a kilencvenes évek közepén egy másik kozmológiai érdekességű fázisátalakulás tárgyalásán dolgozott, értekes, sokat hivatkozott publikációkban vizsgálta meg a feladat tárgyalására szóbaeső módszereket. Miután felismerte, hogy a számítógépes szimuláció a végleges válasz megadására képes egyetlen elegendően pontos eljárás, néhány hónap alatt *Csikor Ferenc*cel (Budapest) és *Montvay István*nal (Hamburg) kialakította azt az önálló megközelítést, amellyel versenyképes lett a már korábban e területen működő csoportokkal. A vizsgálat arra a következtetésre vezetett, hogy az Univerzum anyag–antianyag aszimmetriájának eredete csak egy szuperszimmetrikusan kibővített modell keretei között érthető meg. Ennek az elméletnek a számítógépes vizsgálatához szükséges szuperszámítógépekhez csak körülményesen lehetett hozzáférni Japánban vagy Németországban. Ezért összefogott budapesti kollégáival és egy személyi számítógépekre épülő speciális kommunikációjú úgynevezett PC-klasztert (fürtöt) konstruáltak. A „szegény ember szuperszámítógépének” becézett gépet az akkor diplomamunkáján dolgozó Katz Sándor közreműködésével „tanították meg” az elméleti fizikai feladat megoldására.

Ez az alkotás talán először hozott a fizikán túlnyúló sikert számukra: Fodor Zoltán kollégáival nemzetközi számítástechnikai elismerésben részesült. Katz Sándor pedig ennek a műszaki alkotásnak is minősülő fejlesztésnek sokban köszönhette, hogy két éve elnyerte az MTA *Tálatum díját*. Fodor Zoltán ügyesen használta a gyakorlatias hasznosulás ígéretét is hordozó számítástechnikai elismerést: az öt professzorai közé meghívó wuppertali egyetemet rávette egy jóval nagyobb PC-fürt telepítésére. A jülichi szuperszámítógépes központnak is vezető projektje lett az általa javasolt irányzat. Az Univerzum legkorábbi történetének számítógépes szimulációja a központ vezetői szemében a munkájukat a széles publikum előtt megjeleníteni képes legvonzóbb témának bizonyult, ezért őt kérték fel, hogy most ősszel a müncheni *Science Fairen* a kutatóintézet standján legyen a Jülichben folyó kutatások „arca”. Fodor professzor irodalmi német nyelven, akcentus nélkül (ez is hozzátartozik a mindenben a tökélethez, a véglegest kereső magatartásához) válaszolt a látogatók és az újságírók kérdésözönére.

Tehát már a *Nature*-publikáció előtt többszörösen megtapasztalta, hogy a jól megoldott médiaszerep költséges projektjei támogatásának megszerzésében megtérül. Úgy vélem, tudatosan jutott a *Nature*-beli publikálás gondolatára, amikor a széles tudományos közéletben, a projektek potenciális bírálói között kívánt még pozitívabb visszhangot kiváltani. Meggyőződésem, hogy ez a siker a részecskefizika egészének, azon belül a magyar elméleti részecskefizikusoknak is kedvezőbb megítélést hoz.

Patkós András
ELTE, Fizikai Intézet

2006 augusztusában és még szeptemberben is tele volt a sajtó „a Plútó lefokozásáról” szóló hírekkel, sőt, a médiában jelentős teret kapott, hogy a „kisbolygóvá való lefokozás” miatt súlyos milliókért kell újraírni egyes földrajz- és fizikatankönyveket.

Annak megértését, hogy a Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU) 2006. augusztus 24-én Prágában milyen döntést hozott és miért, kezdjük azzal, hogy szó sincs lefokozásról. Lefokozni csak azt lehet, akit elő is lehet léptetni, márpedig a Plútó nem rendőr- vagy katonatiszt, akinek rangját előljárója megváltoztatja. Az újságírói termékenység újabb képtelen hírt hozott létre. Az égitestek különböző osztályai közötti átsorolásról viszont beszélhetünk – és itt csak ennyiről van szó. Az átsorolás nem precedens nélküli dolog, például a Ceresszel is megesett, mint később látni fogjuk.

Planetáris testek

Asztrofizikai szempontból minden olyan égitestet planetáris testnek nevezünk, amelynek tömege 13 jupitertömegnél kisebb. Ennek a meghatározásnak az az alapja, hogy ezekben az égitestekben – sem a belsejükben, sem pedig felszínükön – természetes úton nem indulnak be magfűzős folyamatok, mert ehhez a tömegük nem elegendő. Az ennél nagyobb tömegű égitestekben azonban beindul a magfűző, akár csupán – csillagászati időskálán mérve – egy pillanatra (barna törpék), akár hosszabb időre (csillagok). De szükség van-e a planetáris testek további osztályozására, és ha igen, akkor az milyen legyen?

Először a bolygó fogalma alakult ki, még az ókorban, sőt, minden bizonnyal az írott történelem kezdetei előtt. Eszerint minden olyan égitestet, amely a csillagokhoz képest mozog, vándorló csillagnak (a szó görögül planétának hangzik), magyarul bolyongó csillagnak, röviden pedig bolygónak nevezünk. Hét ilyen volt ismert kezdetben: a Nap, a Hold, a Merkúr, a Vénusz, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz. *Arisztotelész* óta a hullócsillagokat a Föld légkörében végbemenő jelenségnek tartották (ebben igaza volt), az üstökösöket pedig a Föld kigőzölgéseinek, amelyek a Holdnál közelebb vannak (ebben viszont alaposan melléfogott, de csak 1577-ben derült ki, hogy nincs igaza). A többi csillagot állócsillagnak nevezték – csak 1718-ban mutatta ki *Edmund Halley*, hogy a csillagok is – ha még oly’ lassan is, de – elmozdulnak egymáshoz képest az égbolton. A bolygókról azt tartották, hogy a Föld körül keringenek (egész pontosan egy olyan pont körül, amely a Föld körül kering), s ezt legprecízebben *Ptolemaiosz* fejtette ki Kr. u. 2. században. Ez a bolygófogalom lassan változott annyiban, hogy már nem tartották a bolygókat saját fénnel világító égitesteknek, hanem felismerték, hogy a Nap fényét verik vissza, ezért látjuk

őket. Az ókori próbálkozások (pl. *Arisztarkhosz* vagy *Heraclides Ponticus*) után a 15. században vetették fel komolyan, hogy a bolygók a Nap körül keringhetnek (*Regiomontanus*), sőt, *Nicolaus Cusanus* bíboros azt a gondolatát vetette papírra, hogy minden csillag egy-egy Nap, amelyek körül szintén keringenek bolygók. Ezt a nagyon modern gondolatot teljes egészében csak 1867-re, illetve 1995-re sikerült megfigyelésekkel alátámasztani. 1867-ben kezdte el vizsgálni az angol *William Huggins* a csillagok színképét. Ő és követői megállapították, hogy a csillagok ugyanolyan kémiai elemekből állnak, mint a Nap. Ezzel Cusanus első állítását sikerült bizonyítani. Azt, hogy ezek körül bolygók keringhetnek, először 1995-ben *Didier Queloz* és *Michel Mayor* svájci csillagászok igazolták, felfedezve az első exobolygót, az 51 Pegasi jelű csillag körül keringő Bellerphont.

A bolygófogalom lényeges változása 1543-ban történt, amikor *Kopernikusz* a bolygókról feltette, hogy azok a Nap körül keringenek – kivéve a Hold, amely a Föld körül kering. A Földet ezután tehát ugyancsak bolygónak tekintették. A Nap és a Hold kikerült a bolygók sorából, a Föld holdja pedig a Hold lett (és ez itt nem tautológia, figyeljünk az írásmódra). Kopernikusz tehát nemcsak egy csillagot (a Napot) és egy bolygót (a Földet) fedezett fel, de ő az első holdfelfedező is.

1609-ben a Jupiter körül is fedeztek fel körötte keringő holdakat (*Galilei*) – ezzel legalábbis az a kopernikuszi tétel megfigyelési oldalról nyert igazolást, hogy az égitestek nemcsak egy középpont körül keringhetnek. A Kepler-törvények (1604, 1619) pontos előrejelzést tettek lehetővé, és belőlük – meg a Galilei-féle tehetetlenségi elvből – meg lehetett alapozni a newtoni fizikát (1687). Azóta nyilvánvaló, hogy a bolygók valójában a Naprendszer tömegközéppontja körül keringenek – akárcsak a Nap. Azonban a newtoni fizika alapján levezetett III. Kepler-törvény már lehetővé tette azon égitestek tömegének a meghatározását, amelyek körül kering egy másik égitest (pl. egy bolygó vagy egy Hold). Ebből kiderült, hogy a Nap tömege körülbelül ezerszer meghaladja a Jupiter tömegét, amely a Naprendszerben a legnagyobb tömegű bolygó (pedig a Jupiter tömege is kb. 330-szorosa a Földének), és hogy a Napban összpontosul a Naprendszer tömegének 98%-a. A gravitációs törvény segít nekünk megfelelő meghatározást adni a Naprendszerre is. Eszerint Naprendszeren azt a térrészt értjük, amelyen belül egy égitestre a Nap nagyobb gravitációs vonzóerőt fejt ki, mint a környező csillagok. Ez alapján Naprendszernek a Nap körüli körülbelül 2 fényév (123000 csillagászati egység) sugarú gömböt értjük. Szokás megkülönböztetni belső Naprendszert (a Naptól 100 CSE távolságig) és külső Naprendszert (az előbbi távolságon túli térrész).

Ilyen tömegarányok mellett azonban a Naprendszer tömegközéppontja nem lép ki a Nap belsejéből, tehát szükségtelen módosítani a kopernikuszi definíciót, miszerint bolygó az, ami a Nap körül kering – kivéve az üstökösöket, amelyek napközben csóvát eresztenek és

A 2006. szeptember 26-án Székesfehérváron tartott előadás szerkesztett változata.

a holdakat, amelyek elsődlegesen a bolygók körül keringenek. A 17. század végén írta le először *Jean-Dominique Cassini* az állatövi fényt [1], amelyet már ő maga is helyesen úgy értelmezett, hogy az a Nap körül, a földpálya síkjában vagy ahhoz közel keringő porszemcsékből áll, amely a Nap fényét visszaveri – ez a bolygóközi por. A modern, asztrofizikai értelemben vett planetáris testeket tehát már a 17. század végére bolygókra, holdakra, üstökösökre és bolygóközi porra osztották, és külön kategóriát képviselt a Szaturnusz gyűrűje, amelyet 1655-ben fedezett fel Cassini. Ehhez még vegyük hozzá a meteoroidokat [2], és a Naprendszer legkisebb égitestjeinek osztályozásával készen is vagyunk.

Az Uránusz felfedezése

Az Uránuszt 1781. március 13-án fedezte fel – véletlenül – *William Herschel*. Ez az égitest 84 évente kerüli meg a Napot, átmérője a Földénél négyszer nagyobb (a Jupiter átmérője kb. 11-szer nagyobb a Földnél). Még 1787-ben felfedezője megtalálta két holdját, így tömegét meg lehetett határozni, amely a Földénél 14,5-szer nagyobb. Mérete és tömege alapján bolygó, csak éppen halványasága miatt szabad szemmel nagyon ritkán látszik, folyamatos megfigyeléséhez távcső kell. Így maradt addig észrevétlen az Uránusz, amelyet a Naptól számítva a hetedik bolygónak tekintettek ezután.

Kisbolygók

A bolygófogalmat a 19. század elején kicsit megváltoztatták. Az (1) Ceres, 1801. január 1-jei felfedezését követően, kezdetben bolygónak sorolták be. Hamarosan kitudt azonban, hogy a Ceres mérete (950 km) jóval kisebb az akkoriban ismert többi bolygó közül legkisebb Merkúrénál (4878 km). 1809-ig fedeztek fel további, a Cereséhez hasonló pályán mozgó égitesteket – (2) Pallas, (3) Júnó és (4) Vesta –, amelyek mérete a Ceresével összemérhető, noha annál kisebb volt. A (4) Vesta például 530 km átmérőjű, és a fő kisbolygóöv összességének 9%-a a Vestaiban összpontosul! A szintén 530 km átmérőjű (2) Pallasban pedig 7%. Az első elképzelések szerint egy hipotetikus bolygó (a Phaeton) valamilyen okból (pl. másik bolygóval, üstökössel, holdjával stb. történt összeütközése miatt) szétesett darabjai a négy felfedezett égitest. Ma már úgy gondoljuk azonban, hogy ezek az égitestek nem tudtak összeállni abban a naptávolságban bolygóvá, és eleve nem is érték el a bolygóméretet. A későbbi ütközések pedig tovább darabolták őket.

Herschel ezeket a kisméretű bolygótesteket csillagocskáknak (latin *asteroida*, magyarosan *aszteroida*) nevezte el, de a későbbi csillagászok jobban szerették a kisbolygó (angolul *minor planet*) elnevezést. Kisbolygónak azokat az égitesteket tartották, amelyek az úgynevezett kisbolygóövezetben (a Mars és a Jupiter pályája között) keringenek a Nap körül, és kisebbek a legkisebb ismert bolygónál, a Merkúrénál. A bolygókat ettől kezdve szokás volt nagybolygónak is nevezni. Az üstök-

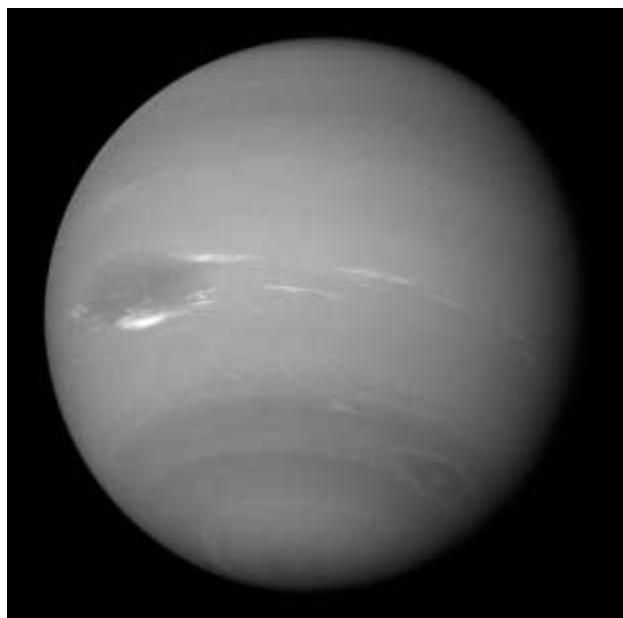
kösköknél kisebb égitesteket pedig meteoroidnak nevezték, ezek a mikrométertől több tucat méterig terjedő égitestek okozzák a hullócsillag-jelenséget. Az ezeknél is kisebb, hullócsillag-jelenséget kis mérete és tömege miatt előidézőni nem képes égitesteket bolygóközi pornak nevezzük.

1845-ben fedeztek fel ismét kisbolygót (az (5) Astraea-t, amely egy körülbelül $167 \times 123 \times 82$ km méretű kisbolygó), és attól kezdve a felfedezések folyamatosan követték egymást. Ma már 130 000-nél is több megszámozott (tehát jól ismert pályájú) kisbolygót ismerünk, számuk azonban ennél bizonyosan több (a becslések szerint 1,1–1,9 millió közötti). A Cereszel később történtek miatt manapság a legnagyobb kisbolygó a (4) Vesta és a (2) Pallas.

A Neptunusz felfedezése

Az Uránusz pályáját természetesen ugyanúgy előre lehetett jelezni, mint a többi bolygóét. A 18. század végére az égimechanika olyan szintre fejlődött, hogy már nemcsak a Nap és a bolygó gravitációs kölcsönhatását tudták figyelembe venni az előrejelzések kiszámításában, hanem a bolygók egymásra gyakorolt hatásait is, az úgynevezett kölcsönös perturbációkat. (Mellékesen, a problémával foglalkozó csillagászok és matematikusok közben kifejlesztették a differenciálegyenletek megoldási módszereinek alapjait.) De míg a többi bolygó úgy mozgott, ahogy az a Newton-törvényekből következett, addig az Uránusz számított és megfigyelt mozgása egymástól eltért. Az eltéréseket egymástól függetlenül *John Couch Adams* és *Urbain Leverrier* egy addig ismeretlen bolygónak tulajdonították, és nehéz számításokat végezve meghatározták pályáját. Míg Adams munkáját Angliában tökéletes érdeklenség övezte, addig Leverrier – az egyébként Adamsénél sokkal pontosabb – számításait Berlinbe küldte. Az általa jósolt helytől alig egy fokra (a telehold átmérője az ég-

1. ábra. A Neptunusz a Hubble-űrtávcsővel készített felvételen





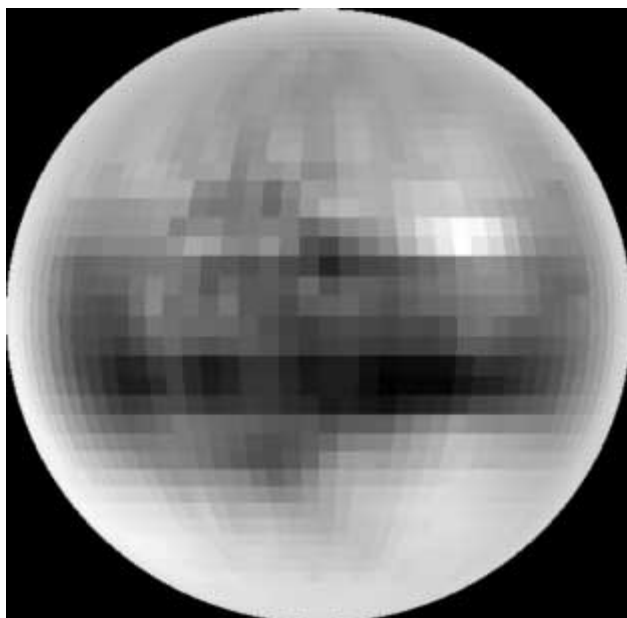
2. ábra. Clyde Tombaugh a felvételek kiértékelésére szolgáló blink-komparátor előtt

bolton fél fok!) *J. Galle* mintegy fél óra leforgása alatt fel is fedezte az új bolygót 1846. szeptember 23-án. A 164 év keringési idejű bolygó a Neptunusz nevet kapta (1. ábra). *W. Lassell* angol csillagász még abban az évben felfedezte legnagyobb holdját, Tritont, amely mintegy hat nap alatt kerül meg az égitestet. Az Uránusz mért és számított mozgásában mutatkozó eltérést a Neptunusz gravitációs perturbáló hatása teljesen megmagyarázta. A Neptunuszt tehát lényegében elméleti úton fedezték fel – ezt tekintjük az égimechanika, és egyben a newtoni fizika teljesítőképessége addigi csúcspontjának.

A Plútó felfedezése

Bár az Uránusz mozgásában helyreállt az összhang az elmélet és a megfigyelések között, most meg a Neptunusz mozgott rosszul: a nyolcadik bolygó nem követte az

3. ábra. A Plútó eddigi legpontosabb térképe



előrejelzett pályát. Kézenfekvő volt az egyszer már bevált módszerhez folyamodni: egy ismeretlen bolygót felelőssé tenni a Neptunusz mozgásában mutatkozó rendellenesség miatt. Többen előre is jelezték ezt a bolygót, sőt *William C. Pickering* több lehetséges bolygót is megadott. *Percival Lowell* amerikai milliomos nemcsak kitanulta az ilyen számítások mesterségét, de pénzt is áldozott az általa a Neptunusz problémájának megmagyarázására szolgáló bolygó megkeresésére. Lowell 1916-ban meghalt, az általa létrehozott alapítványnak az örökösökkel folytatott pereskedései miatt a kutatásra rendelkezésre álló összeg megcsappant, és csak 1928-ra készült el az a 33 cm-es távcső, amellyel a keresési programot a Lowell által alapított Flagstaff Observatóriumban elkezdhetők. A munkára felvett másik amatőr csillagász, *Clyde Tombaugh* (később az egyetemet is elvégezte és hivatásos csillagásszá lett) a Lowell által előrejelzett helyeken nem találta a hipotetikus égitestet, ezért 1929-ben szisztematikus keresésbe fogott az állatöv mentén. A szisztematikus munka 1930 elején hozta meg gyümölcsét, amikor is sikerült találnia egy, a Neptunusz pályáján túl mozgó égitestet (2. ábra). Az új bolygót az akkor 11 éves *Venetia Burney* javaslatára Plútónak nevezték el. Burney-ről nevezték el egyébként a 6235-ös sorszámú kisbolygót, és érdekességként említhető, hogy e kislány nagyapja adott nevet a Mars 1877-ben felfedezett két holdjának, a Phobosnak és a Deimosnak.

Problémák a Plútó körül – a Neptunusz-rejtély megoldása

A Plútó felfedezésekor a Lowell által megadott pozíciótól 10 fokra volt, és ez alapján az égimechanikusok úgy vélik, hogy Tombaugh nem Lowell bolygóját találta meg. Sokáig azt gondolták ugyanis, hogy a Neptunusz mozgásában a számított és a megfigyelt helyzetek közötti különbségért egy mintegy hét földtömegnyi bolygót kell felelőssé tenni. A Plútó pályája azonban nem hasonlít egyetlen olyanra sem, amelyet ennek az eltérésnek a magyarázatára adtak meg, tömege pedig nemhogy hétszerese, hanem csak ezrede a Földének. A Plútó tehát tömegét tekintve túl kicsinek bizonyult ahhoz, hogy a Neptunusz mozgásában mutatkozó rendellenességet magyarázza, így felfedezése sem a Neptunusz pályaháborgásai megmagyarázásának következménye.

A Neptunusz tömegét nehéz volt meghatározni, mert holdja, a Triton, hiába a Naprendszer egyik legnagyobb holdja, óriási földtávolsága miatt meglehetősen halvány. Második holdját, a Nereidát 1949-ben találta meg *Gerard P. Kuiper*, és ez még halványabb, márpedig a halvány dolgokat nehéz mérni a csillagászatban. Sokkal később kiderült, hogy a Neptunusz tömegét kezdetben helytelenül határozták meg. Pontosan csak 1989-ben sikerült megállapítani, amikor a Voyager-2 űrszonda elhaladt a bolygó mellett, és pályaváltozásaiból ki lehetett számolni a bolygó tömegét. A Neptunusz mozgásában az eltéréseket a hibás számítások okozták, amelyek végső oka az egyik nagyon fontos bemenő paraméter, a Neptunusz sokáig pontatlan tömegértéke volt.

A Plútó átmérőjét kezdetben körülbelül 10 000 km-nek hozták ki, amely elég tekintélyes méret: nagyobb a Merkúrnál és a Marsnál is, és csak körülbelül 20%-kal kisebb a Földnél. Joggal gondolták tehát kezdetben és még sokáig, hogy nagybolygót találtak. Az 1950-es években végzett újabb vizsgálatok a bolygó átmérőjét 5000 km-re „csökkentették”, a végső eredmény pedig csak az 1980-as években született meg. Kiderült, hogy átmérője mindössze 2300 km, azaz kevesebb, mint fele a Merkúrénak, a legkisebb addig ismert nagybolygóénak, de még mindig mintegy két és félszer nagyobb, mint a Ceres, az akkor ismert legnagyobb kisbolygó mérete. A főként jegekből álló, kis átlagsűrűségű Plútó tömege inkább a nagyobb kisbolygókéhoz áll közel, semmint a többi, kisebb nagybolygókéhoz (3. ábra).

Átmeneti objektumról lenne szó? Csillagászati szakkörökben, vagy éppenséggel az egyetemeken az 1990-es években már kisbolygóként említették a Plútót, amelyet inkább csak a hagyományok tisztelete miatt sorolunk be a nagybolygók közé – ehhez azért még kellett némi bátorítás is akkor. Még ma is sokan szeretnék, a hagyomány miatt, nagybolygónak tekinteni a Plútót [3].

Új kisbolygóövezet a Naprendszer peremén

Már 1948-ban megjósolták, hogy a Neptunusz pályáján túl is kell lennie egy kisbolygóövezetnek, amely tény a Naprendszer keletkezési elméletéből következne. Csak 1992-ben sikerült megtalálni e kisbolygóövezet első tagját, az (5040) Pholus kisbolygót. Ezt a Neptunusz pályáján túli kisbolygóövezetet *Kuiper-öv*nek nevezzük. Azóta már körülbelül ezer kuiper-övbeli kisbolygót találtak. Ezek közül az egyikről, a három évvel ezelőtt felfedezett 2003 UB₃₁₃ ideiglenes nevű kisbolygóról kiderült, hogy mérete körülbelül a Plútóéval egyező. Sőt, esetleg nagyobb is nála. A Naprendszer tizedik bolygója lenne? A legtöbb csillagász úgy gondolta, hogy a Plútó, amely főleg jegekből áll és sűrűsége nagyon kicsi, tömege alapján inkább csak kisbolygó. Ha ez igaz, akkor a 2003 UB₃₁₃ is csak kisbolygó. A Nemzetközi Csillagászati Unió élelátását bizonyítja, hogy ezt a Plútó pályáján túli égitestet Erisről nevezték el, aki a görög mitológiában a viszály istennője. A név világosan utal arra, hogy mennyi vita volt a 2003 UB₃₁₃ körül... Megtalálói a bolygófelfedezés dicsőségét szerették volna maguknak megszerezni, a vitákat ezért nem kevés személyeskedés jellemezte a háttérben, majd a nyilvánosság előtt is.

Méretbeli eloszlás

A problémákat azonban a személyeskedésen túl tudományosan is meg lehet közelíteni – igazából ez lenne a megfelelő hozzáállás. (De ki tud lemondani a bolygó-felfedezéssel járó hírnévről!?) A Naprendszerben található planetáris testek méretbeli eloszlását vizsgálva az tűnik ki, hogy a legnagyobbtól (a Jupitertől) a legkisebbekig (az állatövi fény porszemcséiig) az átmenet teljesen folyamatos, minden mérettartomány ki van

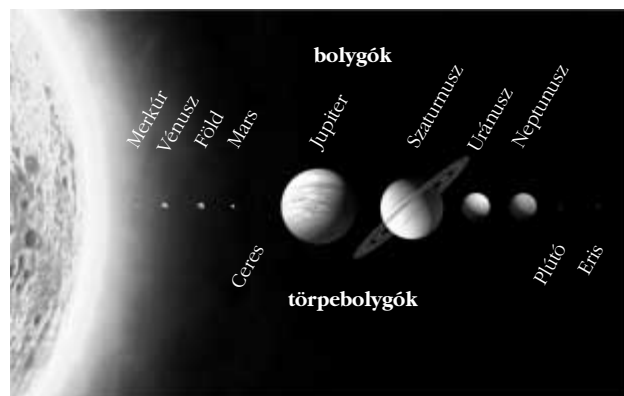
töltve. Sőt, az az állítás is igaz, hogy a csillagoktól lefelé, a barna törpéken át, a más csillagok körül megismert bolygókat is tekintetbe véve, teljesen folyamatos a méretbeli átmenet a legkisebb bolygóközi szemcséig – bár fizikai és csillagászati tulajdonságaikban óriási változások történnek, egyedül a méret alapján nem lehet különbséget tenni bizonyos objektumok között. Egy kései M típusú csillag, amely százszoros jupitertömegű és magjában hidrogénfúzió folyik, ugyanakkora méretű, mint maga a Jupiter vagy egy barna törpe! Tehát a planetáris testek körében is érdemes lehet a méreten kívül más tulajdonságokat figyelembe venni a viták eldöntésénél. A planetológusok ezeket a pálya jellemzőjében és abban találták meg, hogy az égitest hidrosztatikai egyensúlyban van vagy sem.

A vita és a döntés

A vitát az IAU 2000. évi, Manchesterben tartott közgyűlésén nem sikerült véglegesen rendezni (ott úgy határoztak, hogy a Plútó, a hagyományok miatt, maradjon nagybolygó). A 2006. évi, prágai közgyűlésre maradt a döntés. Az elsőként benyújtott határozatterv nem nyerte el a résztvevők tetszését. A vita a döntés napját megelőzően is folyt, sőt, a döntés előtti percekben sikerült csak megszövegezni a véglegesen elfogadott javaslatot – az ilyen eljárásról aligha hihetjük, hogy átgondolt és megfontolt határozattervet képes letenni az asztalra.

Az előző fejezet végén említett ismérvek alapján végül úgy döntöttek, hogy kisbolygó az, ami elsődlegesen a Nap körül kering (tehát nem holdja egyetlen másik égitestnek sem), és – a hidrosztatikai egyensúlytól távol esvén – alakja szabálytalan. Törpebolygó és nagybolygó az, ami elsődlegesen a Nap körül kering (tehát nem hold), hidrosztatikai egyensúlyban lévén pedig alakja gömb vagy ahhoz közeli. A nagybolygók pályájuk térségét megtisztították a velük rezonanciában (ennek jelentését lásd [3]-ban) nem álló kisbolygóktól: azaz például a Jupiter pályáján keringhetnek vele egyenlő keringésidejű, 1:1 napi középmozgás rezonanciában lévő kisbolygók (a trójaiak), de pályája mentén más kisbolygókat nem találunk. A törpebolygók tömege viszont nem elegendő, hogy a pályájuk térségét megtisztítsák a nem rezonáns kisbolygóktól, ezért ők a kisbolygóövezetekben keringe-

4. ábra. A Naprendszer bolygói és törpebolygói



nek. Három égitest került a törpebolygók közé: a Ceres, a Plútó és az Eris (4. ábra). Árulkodó jel, hogy ezeket a döntés szerint a kisbolygók között kell nyilvántartani, nem lesznek külön katalogizálva...

A döntés utóélete

A döntést az IAU mintegy tízezres tagságából körülbelül háromszázan rögtön kifogásolták, jelezve, hogy nem értenek egyet a fenti definícióval. Az aláírók mind egy nemzetből származnak – a következtetéseket a petíció szövege ismeretében mindenki vonja le maga [4]. Még tüntetésekre is sor került a Plútó nagybolygó státusban maradása érdekében – ez kevéssé tudományos érv a Plútó nagybolygókénti osztályozása mellett.

A csillagászok többsége biztosra veszi, hogy 2009-ben a Rio de Janeiro-i közgyűlésen a vita folytatódik – mivel

ez a definíció sok csillagászt így nem elégít ki. Amíg a döntés érvényben van, izlelgessük a törpebolygó fogalmát. Ahogy *Mike Brown*, az Eris törpebolygó felfedezője mondta: „...tekintve ezt az egész őrült cirkuszt, valahogy a helyes válaszba botlottunk. (...) A tudomány nyilvánvalóan önjavító módon működik, még ha néha erős érzelmekek vannak is benne.” [5]

Irodalom

1. KISS CSABA, ÁBRAHÁM PÉTER: *Az infravörös égi báltér* – in: Csillagászati Évkönyv 2004, 216–233.
<http://www.konkoly.hu/evkonyv/infra/infra.html>
2. CSIZMADIA SZILÁRD: *Meteorcsillagászat* – in: Meteorcsillagászati évkönyv 2004, 249–273.
<http://www.konkoly.hu/evkonyv/meteor/meteor.html>
3. BOTH ELŐD – *Természet Világa* 2006/10 (2006) 455
4. http://hirek.csillagaszat.hu/pluto/20060907_pluto_134340_2.html;
KISS L., SÁRNECZKY K.: *Nagybolygóból törpebolygó: (134340) Pluto* – *Meteor* 2006/10 (2006) 3
5. *New York Times*, 2006. aug. 24.

NAGY ÉGBOLTFELMÉRÉSEK A CSILLAGÁSZATBAN

Szabó M. Gyula
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

Bár a laboratóriumi fizika és az asztrofizika ugyanazt a tudományos alapot és nagyjából ugyanazt a tárgyalásmódot használja, megfigyelő módszereik gyökeresen különböznek egymástól. Ennek oka egyszerű: egy ideális laboratóriumban pontosan ismert és hangolható körülmények között elvileg tetszőleges számú kísérlet végezhető, az asztrofizikai megfigyelések alapja viszont azon szörványosan és véletlenszerűen bekövetkező jelenségek összessége, amelyeknek a pontos körülményeit is a jelenség lefolyásából kell kikövetkeztetnünk. Sőt, a megfigyelés szempontjából elegendően gyors lefolyású folyamatok a csillagászatban ritkák. Ezért nem egy esetben fontosabb lehet a megfigyelt jelenség körülményeinek jellemzése, mint magának a jelenségnek a pontos leírása.

Nyilvánvaló, hogy ehhez a kiszemelt jelenség igen sok bekövetkezését kell vizsgálnunk. A megfigyelt jelenségeket rendszerbe állítva fejleszthetjük tovább világképünket. Ennek két különböző módszertani megvalósítása:

1. *válogatott egyedi objektumok részletes vizsgálata*, beleértve a jelenséget befolyásoló paraméterek és a teljes környezet minél pontosabb megfigyelését és értelmezését;

2. *nagyszámú objektum áttekintő jellegű vizsgálata* egyetlen fontos, jól megfigyelhető tulajdonság segítségével. Mivel a második típusú vizsgálatok igen nagy éterület, nemritkán az egész látható égbolt előre meghatározott terv szerint való „végigszelését” jelentik, e stratégiát szokás a *nagy égboltfelmérés* fogalmával jelölni.

A csillagászati vizsgálatok e két megközelítése, az egyedi objektumok részletes megfigyelése és az égboltfelmérés, természetesen nem kizárja, hanem kiegészíti egymást. Min-

dig lesznek kérdések, amelyekre nem lehet égboltfelméréssel válaszolni, és mindig lesznek olyan problémák is, amelyeket *csak* égboltfelméréssel lehet megoldani. A két módszer közti különbség elsősorban ott érhető tetten, hogy az égboltfelmérések gyakran általánosságban fölvethető kérdésekhez és általános összefüggések fölismeréséhez vezetnek, a kérdésekre a részletes válaszokat viszont az egyedi objektumok vagy jelenségek részletes vizsgálatától, és minden megfigyelhető paraméterre kiterjedő, módszeres összehasonlításától várhatjuk. A jelenkor legnagyobb égboltfelmérési vállalkozását, az LSST (Large Synoptic Survey Telescope) üzembe állítását irányító *Željko Ivezić* hasonlatával élve: egy égboltfelmérés olyan, mint a házi orvos: áttekint a „leleteket”, abból következtet az általános állapotra, és a speciális folyamatokat is a „nagy egész” szempontjából értékeli. A diagnosztikai gyanút megfogalmazza, és a beteget szakorvoshoz küldi. Ahogy nyilvánvaló, hogy a beteg megfelelő ellátáshoz mindkét szakember munkájára szükség van, ugyanúgy van szükség a nagy fölmérések és a részletes kutatások együttes alkalmazására a modern csillagászat módszertanában.

E cikk célja, hogy áttekintést adjon az égboltfelmérések módszereiről, a jelen és a jövő programjairól, és ezeken keresztül bemutassa a mai csillagászati kutatások néhány kiemelkedő jelentőségű eredményét.

Az égboltfelmérések tervezése

Az égboltfelméréseket technikailag néhány paraméterrel össze lehet foglalni. Ezek közül a legjellemzőbb a felmérés *bullámhossza*. Ez általában egy közepes vagy széles $\lambda \pm \Delta\lambda$ hullámhossztartományt jelent, a vizsgált elektro-

Az OTKA T042509 és a Magyar Zoltán Felsőoktatási Közalapítvány támogatásával.

mágneses tartomány relatív szélessége $\Delta\lambda/\lambda \sim 5\text{--}30\%$. Minden színképtartomány egyformán fontos, ám a vizuális (pontosabban a látható fény hullámhosszához közel eső, nagyjából 300–1000 nm közötti) tartomány, hosszú történeti előzménye és könnyű elérhetősége miatt, kiemelkedő jelentőségű. A csillagok legnagyobb része ebben a tartományban a legfényesebb, és szinte ez az egyetlen hullámhossztartomány, ahol a földi légkör minden „derült” megfigyelőhelyről többé-kevésbé stabilan átlátszó, a magaslégkör rekombinációs eredetű fénylése pedig még elfogadhatóan kis mértékű. A vizsgált hullámhossztartomány alapján ily módon megkülönböztetünk vizuális (POSS, SDSS, LSST stb.), infravörös (IRAS, 2MASS), mikrohullámú (COBE, WMAP), rádió (GB6, NORTH6cm stb.), ultraibolya (GALEX), röntgen (ROSAT) és gamma (EGRET) égboltfelméréseket.

A *lefedett égtérület* a másik fontos paraméter, különösen azon égboltfelmérések esetében, amelyek válogatás nélkül mindent rögzítenek, ami a képen egyáltalán látható. Bizonyos felmérések az egész égre kiterjednek, más vizsgálatok csak egy kisebb égtérületre, és vannak felmérések, amelyeknek a célpontja esetleg egyetlen látómező.

Sok égboltfelmérés kizárólag egy adott típusú objektum megfigyelésével foglalkozik. Ezt, mivel nem figyel meg mindent az égbolton, észlelőhálózatnak is nevezhetjük, ha több távcső vesz benne részt. Ezek általában a vizuális hullámhosszon működnek. Például kizárólag galaxisok és kvazárok színképének megfigyelésével foglalkozik a 2dF. Néha egy adott célterületen figyelnek meg minden objektumot, hogy abban bizonyos jelenségeket (például Tejútrendszerünk halójához tartozó objektumok gravitációs lencsézését, más naprendszerekben keringő bolygók csillagjuk előtti átvonulásait (tranzit) [1], nagyszámú csillag kis amplitúdójú mikropulzációs változását) figyeljenek meg. Ilyen programok például a MACHO, OGLE, a magyar tervezésű HAT, az űrbéli üzemre tervezett CoRoT- és Kepler-távcsövek, amelyek exobolygókat keresnek, és, mintegy melléktermékként, rengeteg változócillagot is megfigyelnek.

Észleléstechnikai szempontból fontos a látható leghalványabb objektum jellemzése. Egy égboltfelmérés *határfényességén* annak a leghalványabb objektumnak a fényességét értjük, amely még 90%-ot meghaladó valószínűséggel (gyakorisággal) azonosítható a képen. A detektálás hatékonyságát háromféleképpen lehet növelni. Nagyobb apertúrájú távcső alkalmazásával, illetve az expozíciós idő növelésével több fényt gyűjthetünk össze, jobb kvantumhatásfokú detektor használatával pedig az összegyűjtött fény nagyobb hányada hasznosulhat a képrögzítési eljárás során. Mivel a fluxus (W/m^2) az objektum távolságával négyzetesen csökken (nem kozmológiai távolság esetén), kétszer messzebb lévő objektum megfigyeléséhez négyszer hatékonyabb fénygyűjtésre, például kétszer nagyobb apertúrájú távcső használatára van szükség.

A határfényesség és a megfigyelt terület inkább a műszerre jellemző adat. A felmérés e két paramétert együtt tekintve jellemezhető a *térfogatával*. Ennek mértéke a megfigyelt objektumok darabszáma, normálva az objektumtípus térbeli sűrűségével. (A definíció alapján termé-

zetesen a térfogat függ az elért objektumok típusától, tehát minden előnye ellenére is csak tájékoztató jellegű adat.) Ilyen értelemben lehet mondani egy felmérésről, hogy térfogata például $10^9 pc^3$. Ez durva közelítéssel azt is jelenti, hogy azok az objektumokat jelennek meg az adatokban, amelyek egymilliárd köbparseknyi térfogatú környezetünkben vannak.

A felmérés technikai részleteit az egy éjszakára eső adatok mennyisége, a *végző adatmennyiség* és az adat szerkezet jellemzi. Az adatkezelés problémáit szemléletesen mutatja be a *Fizikai Szemle*ben idén augusztusban megjelent cikk [2].

Égboltfelmérések a múltban és ma

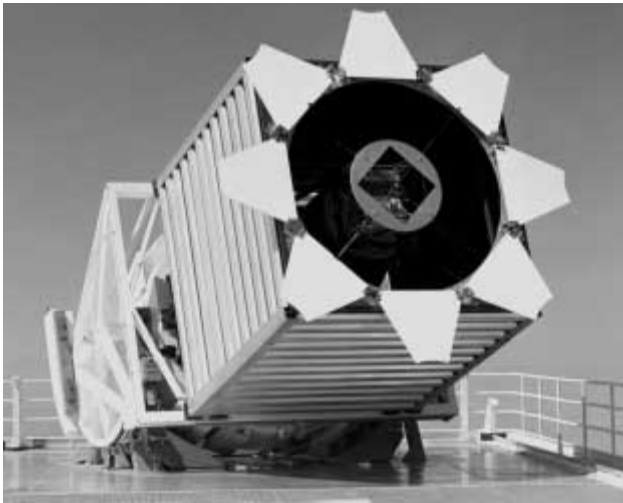
Történelmi jelentőségű égboltfelmérések

Az első jelentős, még szabadszemes égboltfölmérés *Hipparchosz* görög csillagász (Kr. e. 190–125) nevéhez köthető, aki az Alexandriából látszó égbolton 850 csillag fényességét és pozícióját gyűjtötte össze. Katalógusát majdnem kétezer éven keresztül használták. Hipparchosz megfigyelései rögtön szolgáltak is olyasfajta tudománytörténeti jelentőségű fölfedezéssel, amely az égboltfelmérések jellegzetes sajátja. A csillagok pozícióját korábbi mérésekkel összevetve azt tapasztalta, hogy hosszú idő alatt a tavaszpont – ami az Egyenlítő, valamint a Föld pályasíkja égi vetületeinek egyik metszéspontja – kelet felé mozgott az ekliptikán. Ez a megfigyelés helyes, a Föld precessiójából adódóan a forgástengely lassan elfordul, amit Hipparchosz ezzel a felméréssel kísérletileg fölfedezett.

A távcsöves megfigyelések időszakában egyre több vizuális technikával összeállított csillagkatalógus született. Ezek közül a legkiemelkedőbb a fotográfia elterjedése előtti utolsó nagy vizuális katalógus, az 1859–1862 között összeállított *Bonner Durchmusterung*, amely az északi égbolt 324 188 csillagát tartalmazza 9 magnitúdó fényesség-tartományig. Ezen katalógus alapján született meg az első jelentős fotografikus égboltfelmérés, a csillagok színképi vizsgálatára vállalkozó *Henry Draper*-féle katalógus. Ebben a felmérésben több mint 225 000 csillag spektrumát vették föl több műszerrel. Az első egy 8 hüvelyk apertúrájú, 6 fokos törőszögű objektívprizmákkal szerelt távcső volt. E műszerrel a fölmérés első részét *E.C. Pickering* irányította a Harvard Egyetemen (1886–1889), majd kisebb észleléssűrűséggel a perui Arequipában folytatták 1923-ig. (Ma a történelmi jelentőségű, igazán szép kiállítású távcső a lengyelországi Toruńban, a rádiócsillagászati obszervatórium muzeális gyűjteményében látható.) A teljes katalógus 1924-ben jelent meg, 1949-ig két újabb kiegészítéssel. A fölmérés legfontosabb eredménye a csillagok színképosztályozásának megalkotása volt, ami egyenesen vezetett a csillagok modern asztrofizikai elméletéhez.

Napjaink égboltfelméréseinek eredményeiből

Terjedelmi korlátok miatt ebben a fejezetben az optikai és az ahhoz közeli hullámhosszon végzett égboltfelméréseket tekintjük át. Nem lenne tanulságok nélküli a rádió-



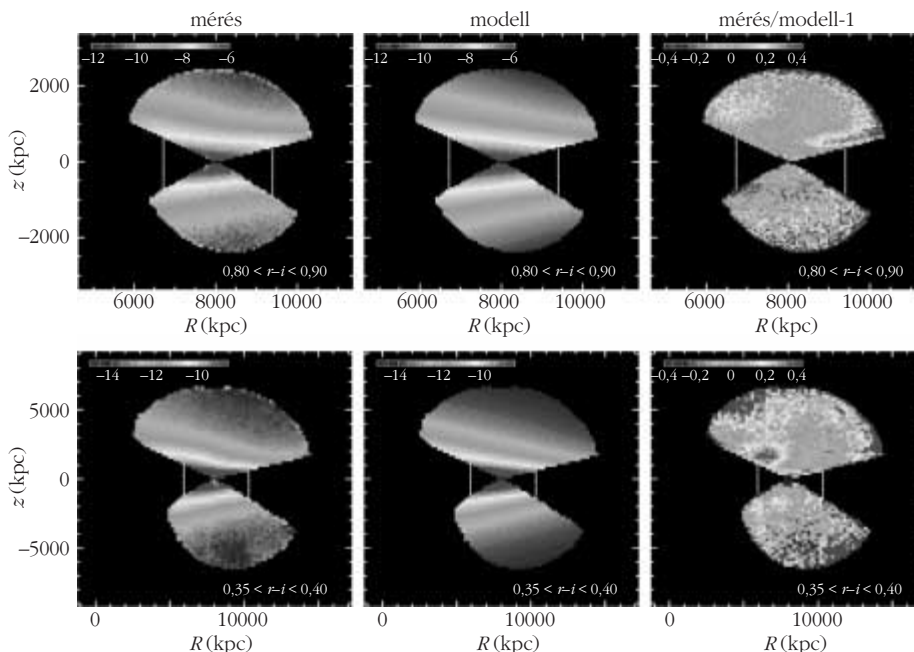
1. ábra. Az SDSS felmérés főműszere

vagy röntgenhullámhosszakon elért eredményeket is bemutatni, ám fő célunk nem a kimerítő technikai vagy tudományos leírás, hanem a „módszertan” ismertetése. Erre pedig, könnyebb érthetőségük miatt is, a bemutatandó égboltfelmérések a legalkalmasabbak.

A 20. század második felének első kiemelkedő jelentőségű felmérése a Palomar Observatórium Égboltfelmérése (POSS), amely az akkori idők legnagyobb, 5 méteres távcsövével készült. Az első fotografikus felmérést 1950–1957 között végezték, amely a nyolcvanas évek közepén kiegészült egy jobb (változó, jellemzően 20,5 magnitúdó körüli) határfényességű, „kék” és „vörös” hullámhossz tartományt lefedő felméréssel. A felvételek digitalizálva szabadon elérhetőek. Számos égterületen máig ez a felmérés szolgáltatja a legjobb határfényességű referenciát.

A kilencvenes években indult, és – elsődleges programját tekintve – napjainkban fejeződött be a Sloan Digi-

2. ábra. Balra: az SDSS által mért csillagsűrűség a Nap környezetében, a fősíkra merőlegesen, a galaktikus haló irányában. Középen az eloszlásra illesztett sima modell. Jobbra: a modelltől való eltéréssel láthatóvá válnak az elnyelt törpegalaxisok [3].



tális Égboltfelmérés (SDSS), amely azonban újabb programokkal még évekig tovább fog üzemelni (1. ábra). Az SDSS tervezésében és az adatok feldolgozásában számos magyar asztrofizikus játszik fontos szerepet, többek között Szalay A. Sándor, az MTA tagja és a Johns Hopkins University professzora. Az elsősorban kozmológiai célú felmérés az Arizonából látható teljes égbolt mintegy harmadrészét számos alkalommal végigméri, 120 megapixeles kamerája 22 magnitúdós határfényességig mindent megörökít. Ötszín-fotometriai vizsgálataiban mintegy félmilliárd forrás szerepel, amihez százezer csillag, százezer kvazár és egymillió galaxis spektroszkópiai vizsgálata is társul. Egy öntanuló algoritmus a különféle típusú galaxisok fölismerése alapján már az ötszín-fotometriai adatsorból is meg tudja becsülni a vöröseltolódást (kb. 20% hibával), s így nemcsak a százezres nagyságrendű spektroszkópiai galaxis- és kvazárkatalógusra lehet távolságot meghatározni, hanem az összes további megfigyelt galaxisra és kvazárra is, lehetővé téve a Világegyetem nagyléptékű szerkezetének az eddiginél jóval részletesebb tanulmányozását.

A közelmúlt felméréseinek eredményét érdemes az SDSS szempontjából értékelni, hiszen ez számos ponton kapcsolódik a korábbi és a későbbi optikai felmérésekhez is. Az adatok alapján sikerült újrajakalibrálni a POSS lemezeket (ami a fotografikus technika erős nemlinearitása miatt volt szükséges). Ezáltal a POSS ötször pontosabb, 0,08 magnitúdós fotometriai hibájú felméréssé „vált”, a pozíciómérés pontossága is hasonló mértékben javult, 0,1 ívmásodperc értékűre.

Az SDSS képeire körülbelül 200 ezer (nem végleges adat) kisbolygó és üstökös került. Nyilvánvalóvá vált, hogy a kisbolygók dinamikai családjainak nagyobb része a családra jellemző anyagú égitestből áll, ami közös eredetre utal. A Jupiter trójai kisbolygói (a Jupiter Nap körüli keringési pályájának L4 és L5 Lagrange-pontjában található testek) között pedig alcsaládok létezésére utalnak jelek. Kiderült, hogy kisebb kisbolygóból kevesebb van, mint korábban gondoltuk, így a Föld-kisbolygó ütközések kockázatát az SDSS a korábbi érték mintegy tizedére csökkentette. Felfedezték, hogy a kisbolygók felszínén gyakran található nagy kiterjedésű színes felületek, amelyek legalább két eltérő folyamat eredményeképpen jöttek létre. Kutatók vizsgálják a kisbolygók alakjának statisztikáját is.

Az SDSS segítette a Galaxis peremvidékeinek feltérképezésében. A Galaxis által bekebelezett törpegalaxisok roncsait, szétszórt csillagait fedezték föl a galaktikus halóban (2. ábra). Új spektrálosztályú csillagokat

fedeztek föl (L, T, C), amelyek egyrészt a kis tömegű lítium- és metántörpéket, másrészt a „széncsillagokat” tartják. A spektroszkópiai adatok elemzése mintegy megkettőszerezte az ismert kataklizmikus kettőscsillagok számát, a fényváltozás alapján hasonlóan növelte az ismert RR Lyrae változócsillagok számát.

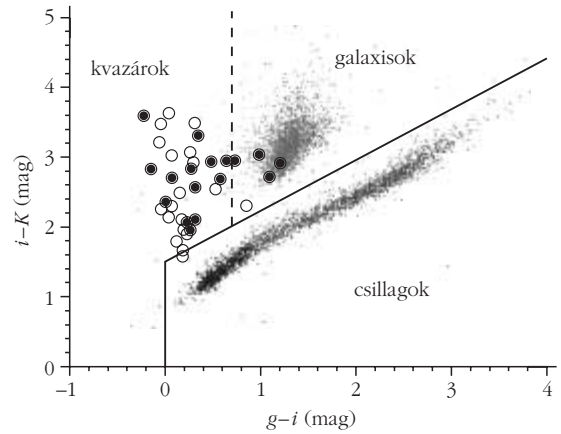
A Galaxisból kitekintve kiderült, hogy az extragalaxisoknak kétféle osztálya létezik, egy „kék” és egy „vörös” típusú, amelyek térbeli eloszlása sem egyforma. Az Univerzum nagyléptékű szerkezetéről megerősítették, hogy a galaxisok „szivacsos” szerkezetbe rendeződnek, és a legnagyobb, 150 millió fényéves léptéken megtalálták a korai Univerzumban még majdnem egyenletesen eloszló anyag apró lokális csomósodásainak, „akusztikus hullámainak” ma látható nyomát. A program jelenleg az Univerzum történetével, összetételével (sötét anyag, sötét energia, sötét sugárzás) kapcsolatos kutatásokat végez, távoli galaxisokban felrobbanó szupernóvákat keresve és követve.

Az SDSS-hez a közeli infravörös oldaláról csatlakozik a Kétmikrométeres Felmérés (2MASS), amelynek segítségével beláthatunk a csillagkeletkezési tartományokba és a Tejútrendszer optikailag gyakorlatilag átlátszatlan felhőkbe burkolt középponti régiójába. Az adatok másfélmillió kiterjedt forrást és 471 millió csillagot tartalmaznak. A felmérés föltérképezte a Galaxis középpontját, nagyon nagy tömegű csillagokból álló csillaghalmazokat fedezett föl, és megerősítette, hogy a Galaxis küllős típusú galaxis, azaz a magvidéke háromtengelyű ellipszoid alakú. Az adatokban igen sok fiatal, laza csillaghalmaz vált láthatóvá, amelyek még a csillagkeletkezés forrásául szolgáló ködbe vannak beágyazva. Ezek a halmazok a köd „eloszlásával” általában gyorsan szétszóródnak, ezért korábban nem sok ilyet ismerhettünk.

A távoli galaxisok apró, csillagszerű objektumoknak látszanak, a legjobb távcsövekkel is nehéz megkülönböztetni a képüket a „valódi” csillagokétól. A csillagok és galaxisok szeparációját tovább nehezíti, hogy mind a csillagok, mind a galaxisok igen sokfélék, ezért változatos színképi megjelenésük lehet. Az SDSS és a 2MASS adatainak összevetésével azonban mindezek ellenére a csillag-galaxis szeparáció gyakorlatilag tökéletessé tehető (3. ábra). Ennek alapja az a meglepő és máig megmagyarázatlan megfigyelés, hogy a galaxisok sokféle spektruma szinte teljesen jellemezhető egyetlen paraméterrel. Például, az ibolya és zöld hullámhosszakon mért fluxusok aránya („szín”, u–g színindex) alapján 20%-os hibával jósolható a színkép 1–2,5 mikrométer körüli részének „színe” (i–K színindex) [3].

Az SDSS-hez az ultraibolya felől kapcsolódik a GALEX műholdas felmérés. Az összevetéssel derült ki, hogy a GALEX próbaüzemben hamis pontforrásokat is detektált, ezt a hibát azóta már kijavították. A program még a kezdeti szakaszában jár, de bizonyos, hogy a forrás csillagok, az aktív galaxisok, a „csillagontó” galaxisok és a kvazárok vizsgálata területén számos újdonsággal szolgál majd.

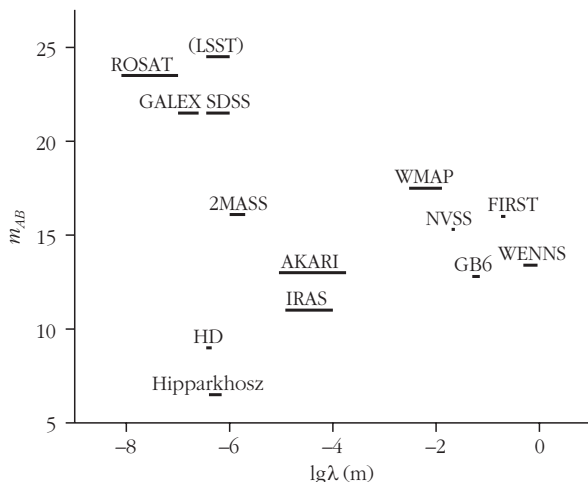
Az optikai felmérések kapcsán föltétlenül meg kell említeni a szupernóvákat és exobolygókat keresésére irányuló felméréseket, amelyek válogatott égitestek folyamatos fotometriai megfigyelésére vállalkoznak. A szupernó-



3. ábra. Csillagok, galaxisok és kvazárok elkülönítése 2MASS–SDSS kétszíndiagramon – jelenleg „kétárnyalat-diagramon” [3].

va-kereső programokról jó áttekintést nyújt *Vinkó József* cikke [4]. A Nagytömegű Kompakt Haló Objektumok (MACHO) és az Optikai Gravitációs Lencsézési Kísérlet (OGLE) a Kis és Nagy Magellán-felhő valamint saját Galaxisunk központja felé tekintve keresi a kompakt objektumok által keltett gravitációs-lencse-hatást és bolygók tranzitjait. A nagy mennyiségű adat emellett a változócsillagok kutatására is bőséges lehetőséget ad. A Magyar Automata Távcső (HAT) elnevezésű projekt Arizonában, Hawaii-n és Izraelben elhelyezett 11–16 cm-es távcsövek hálózatára épülő felmérés, amely az égbolt egy-egy 69 négyzetfokos területét figyelni nagyságrendileg fél éven keresztül. A programot *Bakos Gáspár*, a Harvard Egyetemen dolgozó honfitársunk irányítja. Az elsődleges cél távoli bolygók tranzitjának azonosítása, azonban változócsillagokról is rengeteg pontos fotometriai adat gyűlik. A felmérés az utóbbi időben a médiába is bekerült, az „első magyar fölfedezésű bolygó”, a HAT-P-1 kapcsán. A HAT-hez hasonló program több is fut párhuzamosan, eddig a TReS és a WASP fedezett föl „saját” bolygót.

A tágan értelmezett látható tartományon kívül eső égboltfelmérések bemutatása legalább egy önálló cikket érdemelne. Ezek a röntgen- és a mikrohullámú tartományban végzett űrbeli megfigyeléseket jelentenek, leírásukat jól összefoglalva a hazai irodalomban is föl lehet lelni [5]. Csak utalásképpen említjük meg a ROSAT katalógusát, amely majdnem megszázszorozta az ismert röntgenforrások számát. A mikrohullámú tartományon egy évtized különbséggel működtek a kozmikus háttérsugárzás mérésére fölbocsátott COBE és WMAP műholdak, amelyek megerősítették a háttérsugárzás feketetestjellegét, kimutatták anizotrópiáját és így közvetlenül a korai Univerzumban még homogén módon eloszló anyag kis egyenetlenségeit (akusztikus hullámain). Ezek a megfigyelések részét képezték annak a kutatásnak, amiért a 2006-os fizikai Nobel-díjat odaítélték. Az összes felmérés részletes elemzése helyett a 4. ábrán foglaljuk össze a jelen cikkben említett nagy égboltfelmérések működési tartományát és határfényességét. Az ábra a fényességet a minden hullámhossztartományon értelmezhető AB magnitúdóban tünteti föl, amelynek definíciója $m_{AB} = -2,5 \cdot \lg F \text{ (erg/cm}^2\text{/s/Hz)} - 48,57$, ahol F az objektum spektrális fluxussűrűségé.



4. ábra. A nagy égboltfelmérések határfényessége Hipparchosz ókori katalógusától a tervezett LSST-távcsőig.

Tervek a közeljövőre

A jövőben számos űrbeli felmérés indul. A Kepler- és CoRoT-távcsöveket még ebben az évtizedben pályára állítják. A Nap–Föld rendszer külső Lagrange-pontjában üzemel majd az európai irányítású GAIA-távcső, amely spektroszkópiai és asztrometriai műszer lesz egyben. A várakozások szerint a 15–20 magnitúdónál fényesebb csillagokról 20–200 mikroívmásodperc nagyságrendi pontosságú pozíciómérést és radiálissebesség-mérést végez. Ezzel egymilliárd csillag távolságát és térbeli sebességét fogja megmérni. A műszer indítását 2011-ben tervezik.

A tervezett földi csillagászati felmérések kiemelkedő vállalkozása az amerikai Nagy Szinoptikus Felmérés (LSST). 8,5 méteres távcsövére ember méretű, 3500 megapixeles kamerafejet szerelnek, amely relatíve rövid expozíciókkal 24,5 magnitúdóig (összegezve 27,5 magnitúdóig) megörökíti az eget. A műszer látómezeje óriási, 10 négyzetfokos lesz, ennek köszönhetően az egész eget háromnaponta végig tudja majd mérni! Az összes adat az elkészülte pillanatában teljes elérésű lesz, ami szintén újdonság. Egyetlen éjszaka 35 TByte adat keletkezik majd! A várakozások szerint az LSST föl fogja fedezni a Földre veszélyes összes kisbolygót, a főövben lévő kisbolygókat 500 méter átmérőig, az összes RR Lyrae változócsillagot 1,4 millió fényéven belül, évente fölfedez és kimér 10 000 szupernóvát. Az üzembe helyezést 2012–2014 között tervezik. Az LSST előtt állítják üzembe a Pann-STARRS felmérést, amely 4 távcsővel dolgozik majd az LSST-vel összemérhető hatékonysággal, és hetente méri majd végig a teljes égboltot. A Pann-STARRS a megvalósulás végső fázisába lépett, a távcsövek prototípusa 2006 júliusa óta üzemképes.

Következtetések

Az égboltfelmérés nem mai találmány, a csillagászat tulajdonképpen minden korban élt az egész égre kiterjedő tömeges megfigyelés módszereivel. Ami igazán feltűnő, az napjaink lendületes fejlődése és az eredményesség ugrászerű növekedése: a csillagászati felmérések nyilvánvalóan

fényes jövő előtt állnak. Ennek elsődleges oka a digitalizált technikák (automatizált működés és katalogizálás, digitális tárolás) elterjedése és az adatkezelés hatékonyvá válása. Ezek a technikák – hosszas előzetes munka után – minimális emberi beavatkozással rengeteg adatot állítanak elő. Az adatok kiértékelése digitális képfeldolgozáson alapul, algoritmikusan kell szétválasztani az érdemi információt a képen tárolt zajtól és műtermékektől. Ennek módszerei (detektálás statisztika, maximum entrópia, maximum likelihood, Bayes-módszereken alapuló képfeldolgozás, adattömrítési technikák stb.) manapság érték el a „nagykorúságot”. A legújabban kifejlesztett algoritmusok már „adatlimitált” eljárások: azonos adatból kiindulva azonos eredményre jutnak, és gyakorlatilag ténylegesen kinyerik az összes, a képből elméletileg kinyerhető információt. (Az általában alacsony jelszint, a csillagászati kalibráció bonyolultsága és a képtorzítások miatt ez egyáltalán nem triviális.) A felmérések terjedésének másik oka sokkal prózaibb: a városi fényszennyezés exponenciális ütemű növekedése (ötévente megkétszereződik) is kikényszerítette, hogy a csúcstechnikájú távcsövek adattermelését optimalizálják, ami egyenesen vezet az égboltfelmérésekhez.

Azonban a jövőben is megmarad az egyedi objektumok megfigyelésének jelentős szerepe, mert a közeljövő felmérései sem tudják három napnál sűrűbben megfigyelni az egész eget. A belátható jövőben is egyedileg kell majd vizsgálni a néhány napos vagy annál rövidebb időskálájú folyamatokat. A felmérések ezentúl is gyakran kerülnek a nagy felbontású spektroszkópiai vizsgálatot, ismételt színeképi megfigyelésről pedig egyáltalán nem lehet még beszélni. Ezért a spektroszkópiának, különösen a változó folyamatok spektroszkópiájának is kiemelkedő szerepe marad a jövőben. A keskeny hullámhossztartományra terjedő képrögzítéssel vagy spektrofotometriával kapcsolatban ugyanezt mondhatjuk el.

Az emberi közreműködésre azonban folyamatosan nagy igény lesz. A kalibrációk (és hibalehetőségeik) zöme alól mentesítheti a kutatót egy égboltfelmérés, de a lehetséges összefüggések darabszáma miatt az adatokban tárolt összefüggések kihámozása az elérhető égboltfelmérések darabszámával körülbelül négyzetesen növekvő munkát igényel. (Itt grafikonok elkészítéséről, fizikai modellek teszteléséről és interpretálásáról stb. beszélhetünk.) Az adatok értelmezését és közlését a jövőben sem lehet automatizálni. Mindig nagy szükség lesz az emberi kreativitásra: akár egyedi objektumokkal, akár nagy égboltfelmérésekkel dolgozunk.

Irodalom

1. SZATMÁRY K.: *Exobolygók* – Magyar Tudomány 2006/8 (2006) 968
2. CSABAI I., PAPP G.: *eSCIENCE* – Fizikai Szemle 56/8 (2006) 288
3. Ž. IVEZIĆ és munkatársai: www.astro.washington.edu/aipw/talks/Dub06_ivezic.pdf
4. VINKÓ J.: *Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok* – Fizikai Szemle 56/7 (2006) 221
5. SZABADOS L.: *Közelebb hozni a távot* – Magyar Tudomány, 2004/6 (2004) 678

Internet-ajánlat:

- POSS: <http://archive.stsci.edu/dss/>
SDSS: <http://www.sdss.org>
2MASS: <http://www.ipac.caltech.edu/2MASS>
Magyar Virtuális Observatórium: <http://hvo.elte.hu>
Amerikai Virtuális Observatórium: <http://us-vo.org>

ATTOSZEKUNDUM IDŐTARTAMÚ FÉNYIMPULZUSOK

Keltésük elvének felvetése a KFKI-ban és megvalósításuk későbbi alakulása

Farkas Győző

MTA KFKI Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Napjainkban a nemzetközi irodalomban egyre többször találkozunk a lézerekkel gerjesztett atomok, szilárdtestek vagy szabad elektronok esetén extrém gyors dinamikával attoszekundum nagyságrendű (10^{-18} s; elnevezése: „as”) időtartamok alatt lejátszódó folyamatok említésével. Jóllehet e folyamatok vizsgálata az elmúlt néhány év során viharos fejlődésnek indult, a kulcsszerepet játszó attoszekundumos fényimpulzusok megvalósítási elvének eredetéről és a tényleges megvalósításuk alakulásáról keveset olvashatunk. Ezért a jelen rövid ismertetésben felidézzük az attoszekundumos fényimpulzusok ideájának elvi felvetésére vonatkozó korabeli, a témakörhöz vezető és kapcsolódó előzetes tevékenységeinket a hazai olvasók számára, annál is inkább, mivel azok Magyarországhoz, a KFKI-beli laboratóriumunkhoz kapcsolódnak. Mindezek, továbbá az ismertetendő részletek magyar nyelvű leírása és a fontosabb kapcsolódó irodalmi hivatkozások [1]-ben található.

A klasszikus impulzsfényforrások (pl. villanólámpák) milliszekundumos (ms, 10^{-3} s) időtartamú fényimpulzusaitól napjaink extrém rövid lézerimpulzusaiig a 60-as években megindult lézerfizika mikroszekundum (μ s, 10^{-6} s), nanoszekundum (ns, 10^{-9} s), pikoszekundum (ps, 10^{-12} s) és femtoszekundum (fs, 10^{-15} s) időtartamú impulzusokat szolgáltató lézerek megvalósítása után jutott el – így mi is ezen az úton haladtunk a KFKI-ban. A használt (általában szilárdtest-) lézerek impulzusainak többnyire a látható tartományba eső fényében oszcilláló elektromágneses tér egyetlen ciklusának rezgésidejénél rövidebb időtartamú fényimpulzus előállítására azonban további, újabb típusú lézerek építésével már megvalósíthatatlannak látszott. A megoldást mégis a lézerek igen nagy intenzitású fényének atomokkal vagy szilárdtestekkel történő kölcsönhatásainál fellépő nemlineáris optikai jelenségek szolgáltatták.

Mit értünk itt a „nemlineáris” kifejezés alatt? Ha egy atomi rendszert a szokásos klasszikus fényforrások mérsekelt intenzitása helyett nagy lézerintenzitásokkal gerjesztünk, a szórt vagy kisugárzott fény már a gerjesztő fény második, harmadik, ..., n -edik felharmonikusait is tartalmazza. (Itt meg kell emlékeznünk *Neugebauer Tibor* úttörő munkájáról, aki már a lézerek megjelenése előtt jelezte a fényszórási folyamatoknál a második felharmonikus – igen gyenge – fellépésének lehetőségét.)

A lézerek alkalmazásával azután az 1987–88-as évek kísérletei során kiderült, hogy atomsugár atomjait igen intenzív ($\sim 10^{13}$ W/cm²) lézerfényvel megvilágítva a lézer ω_L frekvenciájának igen magasrendű ($>100 \omega_L$) felharmonikusai keletkeznek kollimált fénynyalábok formájában, körülbelül 10^{-7} hatásfokkal. (A szokásos angol szaknyelvi elnevezés: „High Harmonic Generation”, HHG.) Ma már az ezrediknél magasabb felharmonikusok is elérhetők. Az így kapott diszkrét frekvenciák spektrumának tipikus vázlatos alakja az 1. ábrán látható. A kvantummechani-

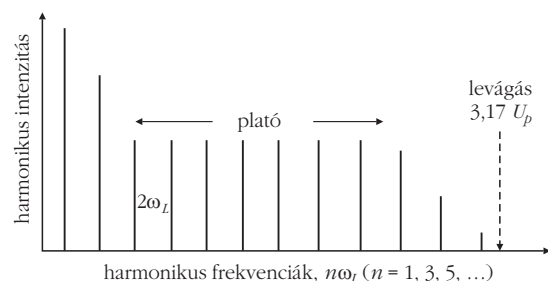
kai számítások szerint atomi rendszerre „nem túl erős” fénysugarat ejtve dipólmomentum indukálódik, e dipólmomentum abszolút értéke négyzetének segítségével kiszámíthatjuk a keletkező dipólsugárzást. (Atomok esetén az inverziós szimmetria következtében csak a páratlan rendek, tehát az $\omega_L, 3\omega_L, 5\omega_L, \dots$, frekvenciák alakulhatnak ki, míg szilárdtesteknél – fémeknél – e szimmetria hiányában minden egész számú harmonikus megjelenik).

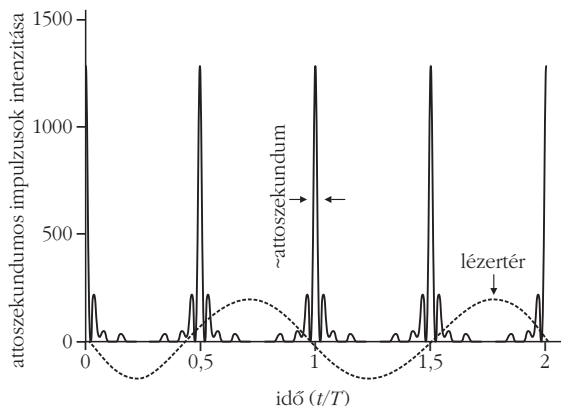
Az 1. ábra szerint a spektrum elején a növekvő rendű felharmonikusok intenzitásainak gyors esése látható (kis intenzitásoknál a spektrumnak csak ez a része lép fel). Az alacsony rendek perturbatív kölcsönhatásnak felelnek meg, amikor a kis intenzitás következtében az atomban fellépő anharmonicitás csak viszonylag kis térbeli eltolódásokat idéz elő, így gyenge dipólmomentum indukálódik. Ilyenkor az elektron egy lépésben több $\hbar\omega_L$ fotonenergia összegének megfelelő, az atom I_{ioniz} ionizációs küszöbpotenciáljánál nagyobb energiával kilép az atomból és eltávozik. Ez a sokfotonos „Küszöb Feletti Fotoeffektus” vagy „Fotoionizáció”, a szokásos angol elnevezéssel „Above Threshold Ionization” (ATI). A lézerintenzitás növelésével a 10^{13} – 10^{15} W/cm² tartományban a kölcsönhatás már nem tekinthető kis zavarnak, perturbációnak. A lézertér hatására az atomi elektron eltolódása az iontól igen nagy lehet: a lézertér az ion Coulomb-terét minden félperiódusban „letöri”, így az elektron számára elkeskenyített potenciálgát jön létre. A kvantummechanikai alagúteffektus által leírható mechanizmussal az elektron bizonyos mértékig „elhagyja” az atomot, és a lézertér félperiódusa szerint irányított pályán mozog. Így az atom elhagyása után a lézertér negyed periódusával bekövetkező polaritásváltáskor az elektron visszafordul, és, amint egyszerű számítással igazolható [2], a közben a lézertérrel felvett klasszikus $3,17 U_p$ mozgási energiával a „szülőionjához” visszacsapódik. Az elektron átlagos rezgési energiája a lézertérben, amit U_p ponderomotoros energiának is nevezünk:

$$U_p = \frac{e^2 E_L^2}{4 m \omega_L^2},$$

ahol e és m az elektron töltése, illetve tömege, E_L a lézer térerőssége. Az elektron vagy szóródik az ionon és a má-

1. ábra. Magasrendű felharmonikusok diszkrét szerkezetű spektruma





2. ábra. A magasrendű felharmonikusok Fourier-szintézise révén keletkező attoszekundumos fényimpulzusok sorozata.

sik irányban teljesen elhagyja az atomot („Optikai Tunnel Ionizáció”), vagy pedig az ionjához befogódva rekombinálódik, fénykibocsátással visszaadva a lézertérrel eddig szerzett összes energiáját egy magasrendű felharmonikus foton formájában [2]. Mivel e folyamat a lézerimpulzus minden rezgése alatt kétszer lép fel (a lézertér-oszcilláció pozitív, ill. negatív maximumánál), a keletkező spektrum vonalas lesz, melyben e vonalak az ω_L lézerfrekvencia kétszeresével ismétlődve követik egymást, összhangban a Fourier-transzformáció szabályaival, amint azt az 1. ábrán látjuk. E spektrumvonalak amplitúdói itt, a nagyintenzitású nemperturbatív (tunnel) gerjesztés tartományában már nem a perturbatív csökkenés szerint haladnak: a vonalak amplitúdója közel konstans (platótartomány), majd a lézertől maximális fotonenergiát, $\hbar\omega_{\max}$, felvett felharmonikus értéknél a spektrum megszűnik, „levág”. A maximális fotonenergia értéke $\hbar\omega_{\max} = I_{\text{ioniz}} + 3,17 U_p$.

Az 1. ábrán látható n értékek a mai kísérletekben már ~1000-ig terjednek, vagyis a levágás előtti tartományban keV energiájú fotonokat lehet kelteni, ugyanakkor az $n = 1$ és az $n = 1000$ értékekkel határolt igen nagy $\Delta\omega$ sáv szélességű fény sugárzást nyerünk.

Attoszekundumos fényimpulzusok sorozatának elvi előállítása magasrendű felharmonikus-nyalábokkal

Az előzőekben nagy vonalakban vázoltuk azokat a folyamatokat, melyek során atomok vagy szilárdtestek kötött elektronjai sokfotonos gerjesztés útján nagy energiákra tesznek szert, majd e nagy energiák leadásával igen széles, diszkrét spektrumú HHG-sugárzást hoznak létre. Az elvi megfontolásokat és kísérleti adatokat összegezve lehetségesnek láttuk 1992-ben a KFKI-ban attoszekundumos impulzusok előállítását az alábbi tények alapján:

1) Az összes magasrendű felharmonikusoknak megfelelő Fourier-komponensek ugyanazon fókuszterületből emittálódnak, és egyetlen kollineáris nyalábban terjednek tovább;

2) Az elméletek szerint a szigorúan egyenlő közű felharmonikusok fázisai inherens módon kötött fázisban rezegnek időben, ami automatikusan biztosítja a korrekt Fourier-szintézis teljesülését;

3) A platóba eső felharmonikusok irány szerinti illeszkedése meglepően jó ebben a nemperturbatív tartományban.

1992-ben, az irodalomban elsőként [3], arra a következtetésre jutottunk, hogy a teljes $\Delta\omega$ spektrumszélességű magas felharmonikus nyalábok Fourier-szintézise révén azokban $\tau \sim 1/\Delta\omega \sim 10^{-18}$ s időtartamú „attoszekundumos” impulzusvonalatok léphetnek fel. Ugyanis, a platótartományra korlátozódva, $\Delta\omega \sim 2N\omega_L$, amiből az impulzushosszra $\tau \sim 30$ attoszekundum adódik. A képletben N a páratlan platóbéli felharmonikusok száma, ω_L a lézerfrekvencia. (Nd-lézernél $\omega_L = 1,8 \cdot 10^{15}$ s⁻¹, és a platóból az $N = 9$ -es értéket választottunk.)

A keltő lézer periódusideje $T/2\omega_L$ lévén, továbbá, mivel a felharmonikusok egyenköze $2\omega_L$, az eredő nyaláb $T/2$ periódussal egymást követő attoszekundumos impulzusok sorozatából áll (2. ábra). Ezen impulzusok $I_{as}(t)$ intenzitásának időbeli alakját az E_p amplitúdóval rezgő $E_p \cos n\omega_L t$ platóbéli felharmonikusok összegének négyzete adja:

$$I_{as}(t) \propto \left| \sum_{n=n_0}^{n_0+N-1} E_p \cos(n\omega_L t) \right|^2 \propto E_p^2 \frac{\sin^2(N\omega_L t)}{\sin^2(\omega_L t)}.$$

A 2. ábrán követett számításokat az argonatombok esetében nyert kísérleti adatok alapján végeztük. Tekintettel $N = 9$ felharmonikus közreműködésére, az I_{as} intenzitás az egyetlen harmonikus $I_{HH} = E_p^2$ intenzitásának körülbelül 100-szorosára nő.

Az attoszekundumos időtartam érzékeltetésére megemlítjük, hogy a hidrogénatombeli elektron Bohr-pályáján 140 as alatt tesz meg egy fordulatot. $\tau = 1$ as alatt a fény $d = c\tau = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s 10^{-18} s = $3 \cdot 10^{-8}$ cm = 0,3 nanométer távolságot tesz meg.

Mondhatjuk, hogy az attofizika találkozik a nanofizikával: új kísérleti eszközt nyertünk az atom belsejének attoszekundumos időbeli, illetve nanométeres térbeli skálán történő felbontásához.

Attoszekundumos impulzusok sorozata és egyetlen elkülönített attoszekundumos impulzus

Attoszekundumos impulzusok sorozatának megvalósítása

Attoszekundumos impulzusok sorozata valójában minden magasrendű felharmonikusokat (HH) keltő kísérletben automatikusan keletkezik, hiszen a keltő lézertérrel és egymással is kötött fázisban rezgő HH-k az előzőekben ismertetett formulával leírt Fourier-szintézis értelmében a 2. ábrán bemutatott attoszekundumos impulzussorozatot eredményezik. A feladat ezen sorozat eddig nem ismert új detektálási méréstechnikákkal történő kimutatása volt. A kapcsolódó kísérletek angol nyelvű összefoglalása a [4] irodalmi hivatkozással.

Az első (1999) ilyen, autokorreláción alapuló próbálkozás során titán–zafir lézer impulzusát Michelson-interferométerben kettéosztva optikai késleltetés céljából újraegyesítették, majd argonatomb-sugárba fókuszálva a késleltetés függvényében a keltett sokfotonos fotoionizáció

ionjainak a lézertényező rezgésidőjével modulált áramát mérték, a rezgési időkhöz egy ~60 as tartamú, nehezen értelmezhető kiugrást nyerve. Ez vitatott eredetű, de az első kvalitatív jelzés volt az attoszekundumos impulzusok létezésére. Később (2003) ilyen autokorrelációs kísérletet kvantitatív szinten a már előzetesen előállított, egymáshoz képest folyamatosan késleltetett HH-fénynyalábokat xenonatomokra fókuszálva és ezúton sokfotonos fotoionizációt kelve végeztek. A kapott ionáram a késleltetés függvényében az előbb említett méréssel szemben a lézer minden félperiódusában csúcsokat mutatott. Ezen autokorrelációs adatokból a kapott attoszekundumos impulzussorozat egy ilyen „csúcs” tagjának időtartamára 780 as adódott, most már közvetlenül mérhető módon.

Még ez előtt a kísérlet előtt (2001) egy másik, bonyolultabb, de egzaktabb módszerrel jóval tisztább és pontosabb eredmények születtek. HH-sugárzás és lézersugárzás egyidejű alkalmazásával ionizálták az atomokat. Nagyon kvalitatívan ezt a folyamatot úgy foghatjuk fel, hogy először a nagyenergiájú n -edik, ω_n frekvenciájú HH-foton $\psi(\omega_n, t)$ hullámfüggvényű fotoelektronja a lézertérbe jut. A lézertényező (rádiófrekvenciás analógiával élve) ω_L lézertényezővel „modulálja” ezt a $\psi(\omega_n, t)$ hullámot, aminek eredményeképpen ω_n körül $\omega_n \pm m\omega_L$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) frekvenciájú „oldalsávok” jelennek meg $\hbar\omega_n \pm m\hbar\omega_L$ elektronenergiákkal. Kellően gyenge lézerintenzitással elérhetjük, hogy csak az $m = \pm 1$ értéknek megfelelő két oldalsáv jelenjen meg. Így az $\omega_n + \omega_L$ és az $\omega_{n+2} - \omega_L$ rendű elektroncsúcsok egybeesnek, egyetlen csúcsot adnak. Hasonlóan, minden egymást ($2\omega_L$ -lel) követő HH-csúcs között lesz egy közös fotoelektroncsúcs. Ha most a HH-impulzust, illetve a lézerimpulzust egymáshoz képest τ idővel késleltetjük, egyszerű elméleti megfontolások [9] alapján e közös csúcs nagysága $\cos(\varphi_{n+2} - \varphi_n + 2\omega_L\tau)$ szerint, tehát $2\omega_L$ szerint változik. Így a felharmonikusok $\varphi_{n+2} - \varphi_n$ fáziskülönbsége és a $(\varphi_{n+2} - \varphi_n) / 2\omega_L$ késleltetés meghatározható. A kísérletet argonban keltett öt HH-vonalat tartalmazó nyalábra végezték el, melyek fázisai HH-vonallról HH-vonalra közel lineárisan haladtak. A HH-csúcsok abszolút értékeit is mérték. Így az 5 HH-vonal amplitúdóját és fázisait ismerve a Fourier-szintézis megadta az attoszekundumos impulzussorozat, illetve abban az egyedi 250 as tartamú impulzusok alakját és fél lézerperiódusnyi követési távolságát is. A kísérletileg így nyert attoszekundumos impulzussorozat $I_{as}(t)$ intenzitásának időfüggése megegyezik a 2. ábrán bemutatott saját előrejelzésünkkel. *Ez a kísérlet volt az első, amelyikben az attoszekundumos impulzussorozatot és az impulzusok alakját objektív módon demonstrálták, igazolva a mi saját felismerésünket és előrejelzésünket a KFKI-ban.*

Későbbi, pontosabb mérések megmutatták, hogy – szemben az előbbiekkal – az ω_n HH-fotonok kibocsátási pillanatai a HH-rend (n) növekedésével késnek, ami pozitív chirp (= a kisebb frekvenciakomponensek előre sietnek; a magyar szóhasználat „csörp”) léte utal az attoszekundumos impulzusban. A legutóbb végzett kísérletben e pozitív csörpöt alumíniumfóliákkal semlegesítették (negatív csörp), és a Fourier-szintézist 12 HH-komponensre végezték el a fentiekben leírt módszerrel. Sikeresült

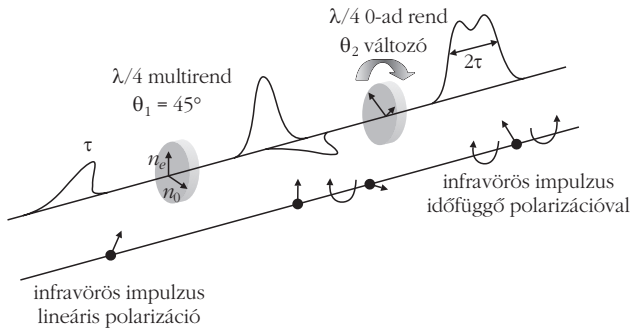
egyszerű berendezéssel rutinszerűen 170 as időtartamú, 30 eV energiájú, $7 \cdot 10^{15}$ Hz középfrekvenciájú impulzusok tiszta sorozatát előállítani.

Egyetlen elkülönített attoszekundumos impulzus megvalósítása

Az előzők során ismertetett attoszekundumos impulzusvonulatok helyett kísérleti vizsgálatokban sokkal alkalmasabb egyetlen különálló impulzus használata. Ilyen impulzust két különböző eljárással állítottak elő.

1) Néhány-ciklusos lézerimpulzust alkalmazó keltéssel

Az első ilyen eljárás a következő. Az attoszekundumos időtartamú impulzusok elvi megvalósításához az 1. ábrán bemutatott HHG-spektrum tulajdonságaiból kiindulva jutottunk. Ilyen spektrumokat először néhányszor 10 ps – 10 fs időtartamú lézerimpulzusokkal keltettek. Kiderült, hogy az ilyen, viszonylag „hosszú” lézerimpulzusok időbeli felütásuk alatt nemcsak felharmonikusokat keltenek, de mint láttuk, ionizálhatnak is. Ionizálva az atomsugár atomjait, nagymértékben lecsökkentik – „fogyasztják” – a még felharmonikus keltésre alkalmas semleges atomok számát. Így a lézerimpulzus maximális elektromos terű oszcillációja (mely a maximális $\hbar\omega_{\max}$ energiájú felharmonikus fotont hozza létre) már csak kevés semleges „hasznos” atomon fejtheti ki hatását, így viszonylag sok kis energiájú és kevés maximális energiájú felharmonikus foton keletkezik, amint azt elméletileg kimutatták. Ezért igen rövid, néhány optikai ciklust tartalmazó, olyan időbeli burkolójú lézerimpulzus használatával, melynél a burkoló közepére esik a maximális elektromos terű oszcilláció, közel folytonos, széles „felharmonikus” spektrumot kelt, mivel ezen egyetlen oszcilláció során eltávolított majd visszafordított elektron elvileg csupán egyetlen egyszer csapódik szülőionjához, nem lép fel periodicitás. (Természetesen ez csak elvileg van így, a maximális előtti, illetve utáni ciklusok is keltenek elhanyagolhatóan gyenge HH-kat). A keletkező folytonos spektrum nagyfrekvenciás végére eső tartomány tükörrel elkülöníthető (a röntgensugárzás tartományába eső) része az „egyetlen” maximális felharmonikus fotonok összesített járulékanak felel meg. E folytonos spektrum a Fourier-eljárás értelmében *egyetlen* fényimpulzusnak felel meg, melynek fotonenergiája a röntgentartományba esik. Ezen impulzus előállítására az első kísérleti lépést az általa kifejlesztett néhány ciklusos lézerimpulzusaival Krausz Ferenc [5] tette meg, *elsőként körülbelül 650 as időtartamú, 97 eV fotonenergiájú egyetlen impulzust nyerve.* Az így létrehozott attoszekundumos fényimpulzusok kimutatásához és metrológiájához természetesen merőben új módszerre van szükség. Mivel mind ezen impulzusok előállításáról, mind kísérleti kimutatásukról a *Fizikai Szemle*ben [5] Krausz Ferenc igen részletes és világos leírást adott, itt csak a detektálás elvének vázolására szorítkozunk. A módszer az attoszekundumos impulzus és a néhány ciklusos gerjesztő lézerimpulzus keresztkorrelációján alapul, amikor is az attoszekundumos impulzus Kr-gázt egy röntgen-fotonnal ionizál a gerjesztő lézerimpulzus jelenlétében. A keletkező fotoelektronok



3. ábra. Az optikai kapu

spektruma a lézervény kétszeres periódusával változik az röntgen-, illetve a lézernyaláb egymáshoz képesti késleltetésének függvényében, amit a kísérletek igazoltak [5]. E kísérlet az attoszekundumos impulzusvonalat kimutatása mellett az *első olyan kísérleti munka, amely egyetlen különálló attoszekundumos impulzust állított elő.*

2) Optikai kapu eljárással

A másik módszer [6] különálló egyetlen attoszekundumos impulzus keltésére a 2. ábrán bemutatott attoszekundumos impulzussorozat egyik tagjának optikai eljárással történő elkülönítése: „optikai kapu”. A módszer a HH-k keltési hatásfokának a keltő lézervény polarizációjától való igen erős függésén alapul, e függés lineáris polarizáció esetén maximális. Így a cél a keltő lézervény polarizációjának olyan időbeli modulációja, amely esetén e keltő lézervény-hosszon belül a polarizáció csak e hossz rövid töredéke alatt legyen lineáris: ekkor a HH (és így az attoszekundumos impulzus) keltés e töredék időtartamra korlátozódik. A kísérleti megvalósítást két kereszttezett kettőtörő $\lambda/4$ -es kvarclemes alkotja (3. ábra). Az első multirendű $\lambda/4$ -es lemez tengelyei $\theta_1 = 45^\circ$ -ra vannak beállítva a bejövő lézervény lineáris polarizációs irányához képest. Így a beeső lézervény két egymásra merőleges (ordinárius és extraordinárius) félimpulzusra hasad. Ha τ lézervény-hossz esetén olyan lemezvastagságot választunk, melynek késleltetése szintén $\sim \tau$, a két félimpulzus „majdnem” τ idővel késik egymáshoz képest. Az eredő impulzus egy $\sim 2\tau$ félértékű, lapos tetejű intenzitásprofil-alakot mutat. Polarizációja a legelején lineáris, közben a két félimpulzus átfedési részén cirkuláris, majd a legvégén újra (ellentétben) lineáris. Átküldve ezen impulzust egy második (zérusrendű) $\lambda/4$ -es lemezen, melynek tengelyei $\theta_2 = 45^\circ$ -ra vannak állítva az elsőhöz képest, a lineáris tér cirkulárisra, a cirkuláris lineárisra változik. E két lemez megfelelő kombinációja ($\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$) a polarizáció olyan módosulását eredményezi, hogy az impulzus kezdetén levő cirkulárisból az impulzus közepén lineárisba, majd a végén újra cirkulárisba megy át. A két félimpulzus „fedési részének” néhány fs-ot kitevő tartományát nevezik „optikai kapu”-nak. Csak ebben léphet fel HH-k és így attoszekundumos impulzus keltése. A $\lambda/4$ -es lemezek optimális beállításával a közepén keletkező HH-impulzus alakja elegendően „hegyessé” tehető egyetlen különálló attoszekundumos impulzus keltéséhez. A legutóbbi időben már 100–200 as *hosszúságú, egyetlen különálló impulzus ilyen előállításáról számoltak be.*

3) Attoszekundumos impulzus keltése fémfelületeken

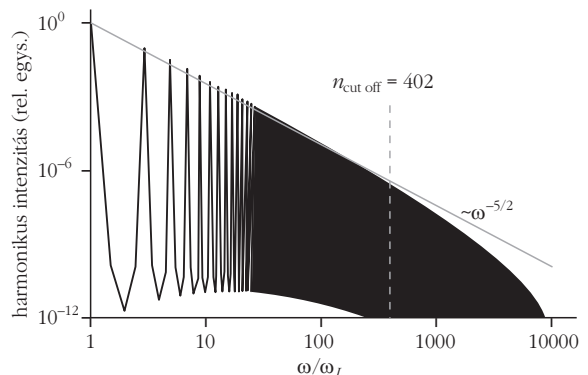
Az eddig atomokban keltett HH-kon alapuló attoszekundumos impulzusok mellett meg kell említenünk azt a sokat ígérő munkát, amely fémek (szilárdtestek) felületén keltett HH-k segítségével készül (különálló) attoszekundumos impulzusokat létrehozni [7]. Atomok esetén ugyanis az atomsugárban levő összes, viszonylag kisszámú atom növekvő lézervény-intenzitásoknál gyorsan ionizálódik, így nagy intenzitásoknál már a HH-keltés növelése lehetetlenné válik. Ugyanakkor fémek esetén, ahol $\sim 10^{23}$ atomi (vezetési) elektron áll rendelkezésre, rendkívül nagy, 10^{20} – 10^{22} W/cm² lézervény-intenzitásokat alkalmazva igen nagy nemlinearitás és igen nagyszámú HH-foton kelthető. Ha elegendően nagy lézervény-intenzitás esik a felületre, ott először az elektronfelhő oszcillál, majd szintén oszcilláló plazmaréteg keletkezik. Ha a plazma elektronsűrűsége a plazma-törésmutató ismert alakjából következő

$$N_e \geq \frac{m \omega_L^2}{4 \pi e^2}$$

feltételt elégíti ki, a plazma „oszcilláló tükörként” veri vissza a lézervényt. Ha az oszcilláló tükörreteg kitérése $x(t)$, a lézervény beesve és visszaverődve kétszer teszi meg az $x(t)$ utat, így a reflektált fény amplitúdójának közelítő időfüggő alakja $\sim \sin(\omega_L t + 2k_L x(t))$, tehát az $x(t)$ tükörreteg időfüggése által meghatározott fázismoduláció lép fel, így Bessel-függvényekkel leírható HH-spektrum keletkezik (4. ábra).

Igen nagy, $\sim 10^{20}$ W/cm², relativisztikus mozgásokat keltő lézervény-intenzitásoknál a tükör rezgését a $\sim \sin(2\omega_L t)$ időfüggésű Lorentz-erő hajtja, így $x(t)$ is $\sim \sin(2\omega_L t)$ alakú. Az ebből kiinduló relativisztikus modellszámítás megadja a HH-spektrum $\omega^{-5/2}$ hatványfüggvény szerint haladó burkolóját, e spektrum $n_{\text{cutoff}} = n_{\text{max}}$ levágási frekvenciájának (mely után a burkoló exponenciálisan leesik) felharmonikus sorszámát, ami $n_{\text{max}} \sim 4\gamma_{\text{max}}^2$, ahol γ_{max} a maximális tükörsebességet tartalmazó szokásos relativisztikus faktor. A harmonikusok polarizációja (továbbá páros, vagy páratlan felharmonikus-rendje) függ a beeső lézervény polarizációjától és intenzitásától. Közel 45° -os beesésnél mind a páros, mind a páratlan felharmonikusok megjelennek. Ha az atomok tárgyalt esetéhez hasonlóan [5] itt is igen rövid, néhány ciklusos keltő lézervény-intenzitást alkalmazunk, a modellszámítás szerint a HH-vonalak

4. ábra. Magasrendű felharmonikusok fémfelületen



va egymást átfedik a spektrum cutoff-tartománya felé. Alkalmas fémszűrővel az alacsonyabb rendű ($n \leq 10$) diszkrét vonalakat visszatartva, a transzmittált maradék spektrális tartomány teljesen folytonos lévén, egyetlen különálló attoszekundum időtartamú, igen intenzív impulzus kelthető. Már a meglévő kísérleti és elméleti eredmények alapján is ~ 10 as időtartamú impulzus várható [7]. A lézerezés intenzitása 10^{22} W/cm² értékre történő növelésével és további optimalizációval pedig a „zeptoszekundum” (zs, azaz 10^{-21} s) időtartamú fényimpulzusok előállítására is megvan a remény.

Az attoszekundumos impulzusok alkalmazásai

Tekintettel az alkalmazások igen nagy és növekvő számára, valamint széles körére, e cikk keretében csupán néhány kiragadott példa rövid ismertetésére szorítkozhatunk. Várható, hogy az attoszekundumos impulzusoknak az időfelbontott atom-, és elektronspektroszkópiában új utakat megnyitó alkalmazásai a tudomány igen sok területén rendkívüli új lendületet adnak.

Ilyen áttörést jelent a kriptonatom Auger-élettartamának valós idejű meghatározása, mérve az attoszekundum tartamú impulzussal történt ionizáció után az Auger-elektronnak a kontinuumba történő kiszabadulási idejét [4]. Számos munka foglalkozik azóta az atomi belső héjak attoszekundumos dinamikájával.

Egy másik új eredmény annak az előzőekben már tárgyalt folyamatnak a vizsgálata volt, amely során a lézertér által optikai alagútmisszióval az atomból „kihúzott”, majd a lézerezés polaritásváltásával ugyanoda „visszacsapott” elektron a visszaforduló pályán töltött idejének a lézerezés ciklusidejéhez viszonyított időzítését atomi skálájú, attoszekundumos pontossággal mérték [4].

Ugyancsak érdekes eredmények születtek az elektron-hullámcsomag attoszekundumos dinamikájával kapcsolatosan. Az egyik legegésőbb munka [8] az „at-

toszekundumos kettős rés” kísérlet (a Young-féle optikai kettős réses ismert kísérlet analogonja), melynél azonban a „réseket” attoszekundumos időkapuk képezték az egyetlen különálló elektron-hullámcsomag számára. Ezen időbeli kettősrés-rendszeren a kvantummechanika alapelveinek szép demonstrálását valósították meg megmutatva az elektroninterferenciát, és egyben az elektronátmenetek attoszekundumos dinamikáját is.

A KFKI-ban 15 évvel ezelőtt végzett kutatásaink akkor még nem is sejtett fontossága az attoszekundumos fizika megalapozásában csak most, az elvégzett kísérletek során nyert bizonyítást. Az ismertetett eredmények és a látványos fejlődés a témakör számára további lehetőségek megvalósulását ígéri már a közeli jövőben.

Irodalom

1. FARKAS GY.: *A sokfotonos folyamatoktól az attoszekundumos fényimpulzusokig* – A kvantumoptika és -elektronika legújabb eredményei, Kiadók: Heiner Zs. és Osvay K., Szegedi Tudományegyetem (2006) 208
2. K.C. KULANDER, K.J. SCHAFER, J.L. KRAUSE: *Dynamics of short-pulse excitation, ionisation and harmonics conversion* – Super-Intense Laser-Atom Physics, edited by B. Piraux et al., Plenum Press, New York (1993) 95
3. M. LEWENSTEIN, PH. BALCOU, M.YU. IVANOV, A. L'HUILLIER, P.B. CORKUM: *Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields* – Phys. Rev. A49 (1994) 2117
4. GY. FARKAS, CS. TÓTH: *Proposal of attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases* – Phys. Lett. A168 (1992) 447
5. P. AGOSTINI, L.F. DIMAURO: *The physics of attosecond light pulses* – Rep. Prog. Phys. 67 (2004) 813
6. KRAUSZ F.: *Atomok és elektronok mozgásban* – Fizikai Szemle 52/1 (2002) 12
7. A. ZAİR, O. TCHERBAKOFF, E. MÉVEL, E. CONSTANT, R. LÓPEZ-MARTENS, J. MAURITSSON, P. JOHNSSON, A. L'HUILLIER: *Time-resolved measurements of high order harmonics confined by polarization gating* – Appl. Phys. B78 (2004) 869
8. G.D. TZAKIRIS, K. EIDMANN, J. MEYER-TER-VEHN, F. KRAUSZ: *Route to intense single attosecond pulses* – New J. Phys. 8 (2006) 19
9. F. LINDNER, M.G. SCHÄTZEL, H. WALTHER, A. BALUŠKA, E. GOULIELMAKIS, F. KRAUSZ, D.B. MILOŠEVIĆ, D. BAUER, W. BECKER, G.G. PAULUS: *Attosecond Double-Slit Experiment* – Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 040401

KOMPLEX KRISTÁLYMORFOLÓGIÁK MODELLEZÉSE HÁROM DIMENZIÓBAN

Pusztai Tamás, Bortel Gábor, Tóth Gyula, Gránásy László
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet, Budapest

A mindennapi életünkben előforduló kristályos anyagok jelentős része polikristályos, azaz nagyszámú kristályszemcséből épül fel. A polikristályos anyag fizikai tulajdonságai nagymértékben függenek az alkotó kristályszemcsék méret és összetétel szerinti eloszlásától, melyet a kristálycsíráképződés és -növekedés viszonya határoz meg. A polikristályos megszilárdulás leírásához tehát olyan elméletre van szükség, amely alkalmas mindkét folyamat leírására. Előző cikkünkben egy olyan, viszonylag egyszerű kontinuum leírást mutattunk be, melynek keretében sikeresen modellezhetők igen bonyolult kétdimenziós polikristályos megszilárdulási alakzatok [1]. A cikk megjelenése óta kidolgoz-

tuk fázismezőmodellünk háromdimenziós általánosítását [2, 3]. A jelen írásban az új modell által nyújtott egyedülálló lehetőségeket szeretnénk illusztrálni.

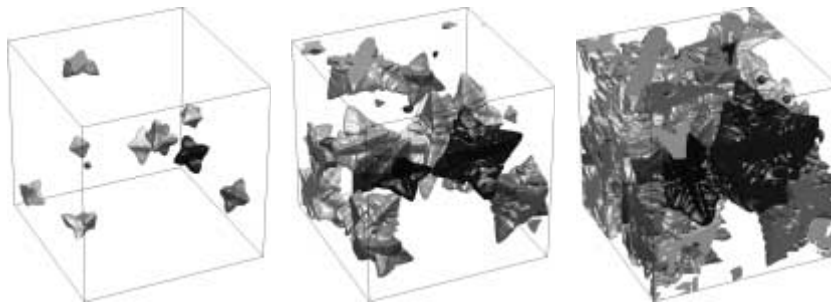
Mivel kiindulópontunk a korábbiakban ismertetett kétdimenziós fázismezőmodell, felidézünk annak néhány alapvető vonását. A lokális fizikai állapotot hely- és időfüggő skalármezőkkel jellemezzük. Így a szilárd-folyadék átmenet leírására a $\phi(\mathbf{r}, t)$ fázismezőt vezetjük be, melynek értéke egy és nulla között változik a kristály-folyadék határfelületen keresztül [1, 4–7]. A fázismező olyan, a kristályban jelenlevő szerkezeti tulajdonság, amely eltűnik a folyadékban (pl. a részecskesűrűség domináns Fourier-

komponensének amplitúdója). Többnyire két- vagy többkomponensű folyadék megszilárdulására vagyunk kíváncsiak, ezért további jellemzőként szerepelhetnek a lokális kémiai összetélt meghatározó – $c_i(\mathbf{r}, t)$ – koncentrációmezők, melyek időfejlődése (a kémiai diffúzió, illetve reakciókon keresztül) befolyásolhatja a kristályosodás folyamatát. A kristályosodó folyadék szabadenergiája több tagból tevődik össze. A tömbi fázisok összetétel- és hőmérsékletfüggő szabadenergiáján felül figyelembe kell vennünk a fázismező térbeli változásához rendelhető járulé-

kot is, melyet a gradiensnégyzet közelítés keretében tárgyalunk (ebből a tagból ered a felületi szabadenergia). A tömbi szabadenergia a lehetséges kristály-, illetve folyadékállapotok számától függően legalább két minimummal rendelkezik, melyek a makroszkopikusan megvalósuló stabil és metastabil fázisoknak felelnek meg. Kristályosodás során a rendszer a túlhűtött (metastabil) folyadéknak megfelelő lokális minimumból a stabil kristályos fázisnak megfelelő mélyebb minimumba kerül, miközben át kell jutnia e két minimum közti szabadenergia-gáton. Homogén túlhűtött folyadékból kiindulva erre csak a termikus fluktuációk figyelembevételével nyílik mód. Az átalakulás időbeli lefutását tehát az egyes mezők időfejlődését meghatározó nemlineáris mozgásegyenletek, a bennük szereplő mobilitások (melyek a translációs, illetve kémiai diffúziós együtthatókkal hozhatók kapcsolatba), illetve a termikus fluktuációkat reprezentáló zaj tulajdonságai együttesen határozzák meg. Ez utóbbiakat a fluktuáció-disszipáció tétel határozza meg.

Több kristály egymással versengő növekedésekor meg kell különböztetnünk a különféle kristálytani orientációkat, azaz meg kell adnunk, hogy az egyes kristályszemcsék esetén a kristálysíkok hogyan állnak a laboratóriumi rendszerhez képest. Két dimenzióban ez a Kobayashi és munkatársai [8] által bevezetett *orientációs mező* segítségével tehető meg. Amennyiben azt is feltesszük, hogy a szilárd fázisban az orientációs tér változásához tartozó szabadenergia-járuléka arányos az orientációs mező gradiensének abszolútértékével, éles szemcsehatár és az orientáció szögkülönbségével arányos szemcsehatár-energia adódik, ami elfogadható közelítés kis és közepes szögű szemcsehatároknál.

Kobayashi és munkatársai [8] csak a kristályos fázisban értelmezték az orientációs mezőt. Valójában a kristályos rend, és ennek részeként a kristálytani orientáció is (azaz, hogy milyen irányban állnak az adott kristály síkjai) fokozatosan alakul ki a kristály–folyadék határterületen. E jelenség leírásához az orientációs mezőt a folyadéktartományokon is értelmeztük [1, 4–7], ahol a lokális orientáció időben és térben korrelálatlanul ingadozik, amit az orientációs mozgásegyenlethez adott zaj biztosít. Ehhez az alábbi fizikai kép rendelhető: Amennyiben megkeressük azt az irányt, melynél a kristályos elsőszomszéd-környezet a legjobban hasonlít a vizsgált folyadékmolekula környezetére (pl. szögkorrelációt vizsgálunk), minden egyes fo-

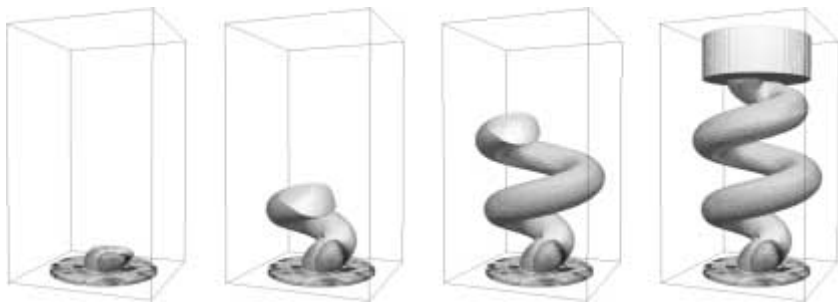


1. ábra. Véletlen orientációjú kristályok homogén nukleációja és dendrites növekedése $\text{Al}_{50,8}\text{Ti}_{49,2}$ olvadékból a kifejlesztett polikristályos fázismező elmélet szerint. A számolás $480 \times 480 \times 480$ rácson, köbös kristályszimmetriák és periodikus határfeltétel mellett történt. A felületi szabadenergia anizotrópiája 2,5%-os volt. A különböző szürke árnyalatok különböző kristálytani orientációkat jelölnek.

lyadékmolekulához hozzárendelhető egy pillanatnyi orientáció. Ez az orientáció térben és időben folyamatosan ingadozik. Azt, hogy a pillanatnyi illeszkedés mennyire jó, a másik szerkezeti rendparaméter, a fázismező aktuális értéke tükrözi. A kristályosodási fronton áthaladva a folyadékbeli véletlenül ingadozó lokális orientáció fokozatosan beáll az adott kristályszemcsét jellemző irányba. Az orientációs szabadenergia általunk javasolt formája biztosítja, hogy az orientációs rendeződés a fázismező változásával (a kristályosodással) szinkronban lép fel, míg a szilárd fázisban visszajutunk az orientációs szögkülönbséggel arányos szemcsehatár-energiát.

Az orientációs mező időfejlődését leíró mobilitás az orientációs egyensúly kialakulásának időskáláját meghatározó úgynevezett rotációs diffúziós állandóval hozható kapcsolatba. Komplex molekuláris folyadékokban, alacsony hőmérsékleten, a rotációs diffúziós együttható jelentősen lecsökken a növekedési sebességet meghatározó translációs diffúziós együtthatóhoz képest. Ennek tulajdonítható a polikristályos növekedési mintázatok megjelenése nagy túlhűtéseknel. A gyorsan haladó megszilárdulási fronton nincs mód a tökéletes orientációs rend kialakulására: orientációs hibák, szemcsehatárok fognak be a kristályos fázisba. Ezen elképzelések alapján kétdimenziós modellünk segítségével a polikristályos alakzatok széles spektrumát reprodukáltuk [1, 4–7].

A három dimenzióra történő általánosítás azonban nem egyszerű. Szemben a kétdimenziós esettel, ahol egyetlen szög megadása elegendő egy kristálysík orientációjának rögzítéséhez, három dimenzióban három szög szükséges: a kristálysíkok normálisának iránya két szöggel adható meg. Azonban ezen tengely körül még egy további szöggel elforgatható a kristály. Definiálnunk kell emellett a két kristályszemcsé közötti orientációkülönbség mértékét is. Ehhez, az általánosság megszorítása nélkül, rendelünk derékszögű koordináta-rendszereket a kristályokhoz. A szemcsék orientációját jelképező két koordináta-rendszer egymásba vihető egyetlen jól meghatározott tengely körüli forgatással. Az orientációbeli különbség mérésére ezen forgatás szögét választjuk. Ezek után viszonylag egyszerűen megadható az orientációs szabadenergia olyan megfogalmazása, melyben (a) a szemcsehatár-energia arányos az orientációs fentiek szerint definiált szögkülönbségével, és (b) melyből a kétdimenziós határesetben visszajutunk korábbi modellünket. További figyelmet igényel a kristályszimmetriák



2. ábra. Egykristály szerkezeti elemek öntésére szolgáló orientációszelektor fázismezőmodellje. A megszilárdulás felületi nukleációval indul a modell alján. A spirális nyakba csak néhány orientáció jut be, és csak egyetlen orientáció jut keresztül lehetővé téve, hogy a szerkezeti elem (a felső részen található henger) egykristályként szilárduljon meg. A különböző szürke árnyalatok különböző kristálytani orientációknak felelnek meg. A számolás $200 \times 200 \times 400$ -as rácson, köbös kristályszimmetriák és periodikus határfeltétel mellett történt. A felületi szabadenergia anizotrópiája 2,5%-os volt.

kezelése: Ha két kristályszemcse szimmetriaművelettel egymásba vihető, akkor kontinuummodellünkben nem képződhet közöttük szemcsehatár. Ezt az orientációs mozgásegyenlet megoldása során vesszük figyelembe.

A fentieknek megfelelően egy kétalkotós olvadék kristályos megszilárdulásának leírására csatolt, sztochasztikus parciális differenciálegyenleteket oldunk meg numerikusan, periodikus határfeltétel mellett. Ehhez párhuzamos számítógépes kódot fejlesztettünk ki, melynél a szimulációs ablakot olyan térbeli tartományokra osztjuk, amelyet egy-egy számítógép-processzor kezel. A szükséges számítási kapacitás biztosítására egy 61 és egy 121 processzorból álló személyi számítógép „fürtöt” építettünk fel az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetében. Az utóbbi egység számítási teljesítménye $\sim 0,5$ teraflop (azaz $0,5 \cdot 10^{12}$ lebegőpontos művelet másodpercenként). A háromdimenziós fázismező-szimulációk meglehetősen számításigényesek, így például az 1. ábrán látható szimuláció, melyet $\sim 110,6$ millió rácsponton végeztünk, közelítőleg egy hétig futott 100 processzoron.

A szimuláció során homogén, túlhűtött folyadék a kezdőállapot. A kristályos fázis megjelenése a kétdimenziós esethez hasonló módon [1], a termikus fluktuációkat modellező zaj hozzáadásával, véletlen helyen véletlen orientációval létrejövő csírák kialakulásával történik. Amennyiben nincsenek idegen felületek a rendszerben, a csíráképződés (nukleáció) a folyadék saját termikus fluktuációival – *homogén* módon – történik. Az idegen felületek elősegíthetik a kristálycsíra képződést, mely esetben *heterogén nukleáció*ról beszélünk. Minthogy a homogén csíráképződés valós körülmények között szinte sosem fordul elő, és a gyakorlat számára érdekes esetekben a kristálycsíráképződés a konténerfalakon, illetve idegen részecskék felületén heterogén módon történik, módszert dolgoztunk ki a heterogén nukleáció leírására. A nukleációval létrejött kristálycsírák tovább növekednek. Az ennek során fellépő diffúziós instabilitások és az anizotrópia összjátéka következtében bonyolult, úgynevezett dendrites alakzatok jöhetnek létre, melyek ágai jól meghatározott kristálytani irányokban nőnek (részletesebben ld. [1]). A modellünk által nyújtott lehetőségeket néhány látványos polikristályos mintázat létrejöttének folyamatán keresztül szemléltetjük. (Honlapunkon további információ kapható a fenti modellek részleteiről [9].)

A) A fentiekben említett homogén csíráképződés és dendrites növekedés útján történő megszilárdulás folyamata látható az 1. ábrán. A szimulációkban kialakuló dendrites morfológia igen hasonló a kísérletekben megfigyelthez, és az időfejlődést leíró kinetikus (Avrami–Kolmogorov) exponens is közel áll a kísérleti értékekhez.

B) Az egykristályelemek előállítására széles körben használt eszköz, az *orientációszelektor* („pigtail”= malacfarok) működését illusztrálja a 2. ábra. A megszilárdulás a minta alján felületi (heterogén) csíráképződéssel indul, s így kezdetben számos eltérő orientációjú kristályszemcse verseng egymással. A spirálisan kanyarodó orientációszelektoron (folyadékkal töltött csatornán) azonban már csak egyetlen orientáció jut keresztül, lehetővé téve egykristályelemek készítését.

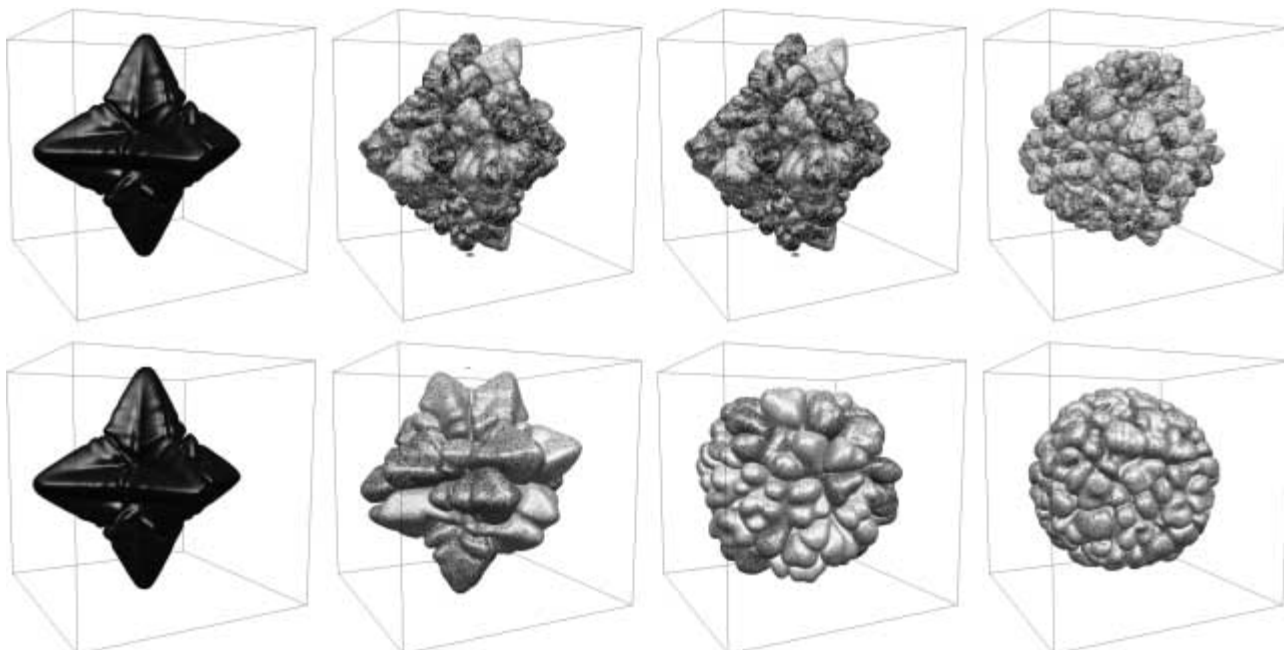
C) A kétdimenziós esethez hasonlóan, megfelelő körülmények között bonyolult *polikristályos növekedési formák* jönnek létre három dimenzióban is. Ezek a mintázatok egykristálycsírából erednek, de növekedésük során újabb és újabb kristályszemcsék képződnek a peremükön. Az eltérő orientációjú új szemcsék kialakulása kétféle módon is elérhető:

- i) Idegen részecskéket adalékolunk az olvadékhoz;
- ii) Lecsökkentjük az orientációs és fázismező mobilitások arányát.

Mindkét mechanizmus alkalmas arra, hogy az egykristály dendrites morfológiát polikristályos gömbszerű, úgynevezett szferolitikus (gömbszerű, részben vagy teljesen kristályos) alakzattá változtassuk (3. ábra). A morfológiai átmenet oka a következő. Bár a dendrites forma kialakulásához szükséges anizotrópia végig jelen van, az (i) esetben az idegen részecskék növekvő száma miatti zavar, míg a (ii) esetben a relatíve lassú orientációs rendeződés miatt fellépő orientációs hibák (szemcsehatárok) befagyasztása a kristályba csökkenti a szemcseméretet, aminek következtében egyre kevésbé érvényesül az anizotrópia hatása.

D) Az orientációs mobilitás csökkentésével analóg módon hat a *növekedési morfológiára* a *termodinamikai hajtóerő* (túlhűtés vagy túltelítés) növekedése. Ekkor a kristályosodási front haladási sebessége megnő, így nagyobb számban kerül sor az orientációs hibák szilárd fázisba történő befagyasztásával képződő új szemcsék kialakulására. A túltelítés növelésével a túszerű egykristály-növekedési forma fokozatosan átmegy a radiálisan növekvő szemcsékből álló térkitöltő, szferolitikus alakzatba (4. ábra). Megjegyzésre méltó, hogy a szferolitikus növekedési forma egyike a talán legáltalánosabb polikristályos alakzatoknak. Megfigyelték öntöttvasban (szferolitikus grafit szemcsék), fém- és oxidüvegekben, polimerekben, biopolimerekben. Szferolitikus szerkező lehet például a vesekő, az inzulinkristályok, vagy az érfalon képződő koleszterinlerakódás, de a csokoládéban is kialakulhatnak ilyen struktúrájú kristályszemcsék.

A polikristályos fázismező-elmélet csoportunk által kidolgozott háromdimenziós általánosítása lehetővé teszi



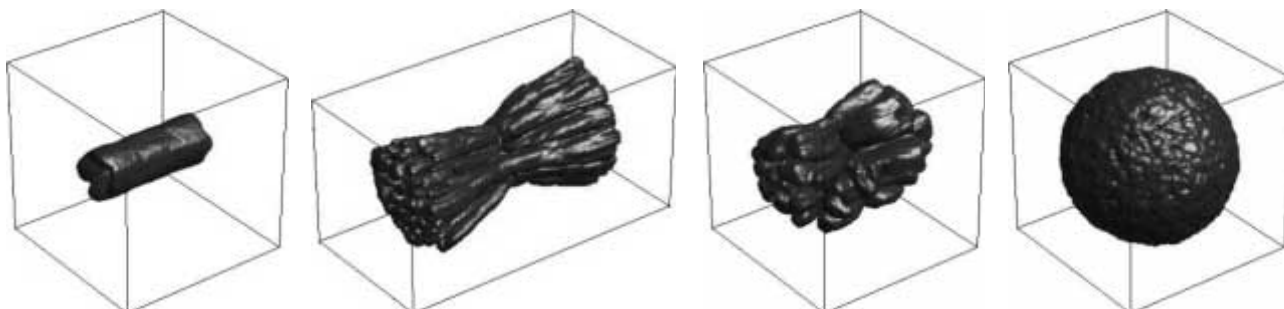
3. ábra. Morfológiai átmenet az egykristály dendrites szerkezet és a szferulitos polikristályos alakzat között. A felső sorban az idegen részecskék részecskesűrűsége balról jobbra 0, 0,6, 0,8 és 1,0 (tetszőleges egységekben). Az alsó sorban az orientációs mobilitás értéke szoródik az alábbi faktorokkal: 1,00, 0,20, 0,15 és 0,10. A különböző szürke árnyalatok különböző kristálytani orientációknak felelnek meg. A számolás $200 \times 200 \times 200$ rácsos, köbös kristályszimmetriák és periodikus határfeltétel mellett történt. A felületi szabadenergia anizotrópiája 2,5%-os volt.

a természetben és a laboratóriumokban előforduló bonyolult polikristályos mintázatok kialakulásának modellezését. Termodinamikai adatbázisokkal és az olvadékok áramlását leíró hidrodinamikai kódokkal összekapcsolva modellünk hozzájárulhat a tudományos igényű anyagtervezés megalapozásához. A fenti kutatásokon alapuló mikroszerkezeti szimulációk fontos részét képezik az Európai Unió 6. keretprogramja által támogatott IMPRESS projektnek, valamint két, az Európai Űrügynökség/Magyar Űrkutatási Iroda által finanszírozott, ESA PECS pályázatnak, melyek célja gazdaságosabb gázturbinák, javított tulajdonságú mágneses és kompozit anyagok, valamint környezetbarát csapágyanyagok kifejlesztése, az ehhez szükséges elméleti/gyakorlati tudás létrehozása.

A szerzők köszönetüket fejezik ki Iglói Ferencnek és Tegze Györgynek a kéziratukkal kapcsolatos kritikai megjegyzéseikért és észrevételeikért.

A fenti vizsgálatok az EU FP6 IMPRESS projekt (NMP3-CT-2004-500635), és OTKA (T037323, K62588), valamint ESA PECS (98005, 98021) pályázatok támogatásával történtek. Pusztai Tamás és Bortel Gábor kutatásait Bolyai János ösztöndíj segítette.

4. ábra. Átmenet tűkristályból a polikristályos szferulitmintázatba a túltelítés növelésével. A szimulációk $200 \times 200 \times 200$, illetve $200 \times 400 \times 200$ rácsokon monoklin szimmetria és a fázismező mobilitásának erős aszimmetriája mellett történtek. Balról jobbra a túltelítés értéke rendre $S = 0,76$, $0,86$, $0,88$ és $0,90$.



Irodalom

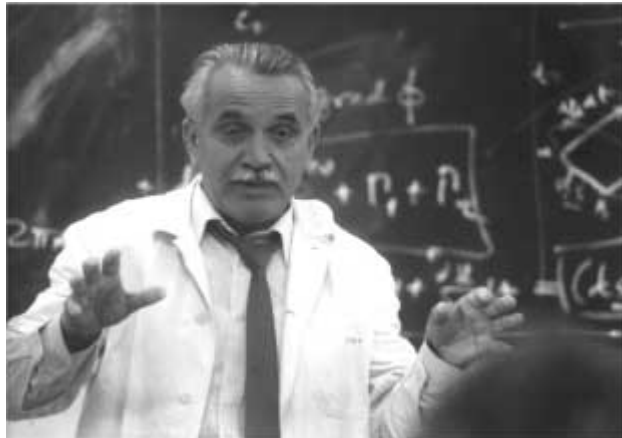
1. GRÁNÁSY L., PUSZTAI T., BÖRZSÖNYI T.: *A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése* – Fizikai Szemle 55 (2005) 203–211
2. T. PUSZTAI, G. BORTEL, L. GRÁNÁSY: *Phase field theory of polycrystalline solidification in three dimension* – Europhysics Letters 71 (2005) 131–137
3. T. PUSZTAI, G. BORTEL, L. GRÁNÁSY: *Phase field modelling of polycrystalline freezing* – Materials Science and Engineering A 413–414 (2005) 412–417
4. L. GRÁNÁSY, T. BÖRZSÖNYI, T. PUSZTAI: *Nucleation and bulk crystallization in binary phase field theory* – Physical Review Letters 88 (2002) 206105-1–4
5. L. GRÁNÁSY, T. PUSZTAI, J.A. WARREN, J.F. DOUGLAS, T. BÖRZSÖNYI, V. FERREIRO: *Growth of “dizzy dendrites” in a random field of foreign particles* – Nature Materials 2 (2003) 92–96
6. L. GRÁNÁSY, T. PUSZTAI, T. BÖRZSÖNYI, J.A. WARREN, J.F. DOUGLAS: *A general mechanism of polycrystalline growth* – Nature Materials, 3 (2004) 645–650.
7. L. GRÁNÁSY, T. PUSZTAI, J.A. WARREN: *Modelling polycrystalline solidification using phase field theory* – Journal of Physics: Condensed Matter 16 (2004) R1205–R1235
8. R. KOBAYASHI, J.A. WARREN, W.C. CARTER: *Vector-valued phase field model for crystallization and grain boundary formation* – Physica D 119 (1998) 415–423
9. <http://www.szfi.hu/~grana/crystal.html>

NAGY KÁROLY 80 ÉVES!

Nem hiszem, hogy különösképpen be kellene mutatni *Nagy Károly* professzor urat a hazai fizikus, illetve fizika-tanár társadalomnak. Fizikus és tanárszakos hallgatók generációit tanította elméleti fizikára, nevelte a fizika szeretetére. A fiatalabb generáció pedig ismerheti például a 2005-ben, a *Mindentudás Egyeteme* sorozatban tartott nagysikerű előadásából.

Az oktatói tevékenységet ma is lelkesen folytatja, hallgatói ma is nagyon szeretik. Egybevág ez azzal, hogy tanári diplomája van: 1950-ben szerzett matematika-fizika szakos tanári diplomát az ELTE-n. Pályafutása azóta is az ELTE-hez kapcsolódik. A Novobáztzy-iskola tagjának vallja magát, átvéve mesterének számos pozitív törekvését. Az ELTE Elméleti Fizikai Tanszék és a hozzá csatlakozó MTA–ELTE Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoport vezetését 1968-tól, *Novobáztzy Károly* halála után vette át, de már azelőtt is fontos szerepet játszott a közösség irányításában. Egyik alapelve – melyhez mindvégig következetesen ragaszkodott – az volt, hogy fiatal munkatársait kizárólag szakmai és emberi tulajdonságaik alapján választotta meg. Nem állított korlátot tudományos ambíciójuk útjába, tanszékén mindig a legmesszebbmenően érvényesült a kutatói szabadság. Szerepet vállalt az egyetemi életben (például az ELTE rektoraként) és az MTA tudományos szervező munkájában is. Ilyen irányú elfoglaltságai miatt volt életének olyan periódusa, amikor a kutatásra kevesebb idő, energia maradt.

Eredményeinek listája így is meggyőző. Tisztázta a fotonok viselkedését izotrop és anizotrop átlátszó közegekben, foglalkozott neutrínófizikával, különösen a neutrínótömegek kérdésével, a kvantummechanika és a rela-



tívitáselmélet különböző problémáival. Az utóbbi években a 20. századi fizika tudománytörténeti vonatkozásainak kutatása teszi ki munkásságának nagy részét.

Kollégái és ismerősei számára az Ő jelenléte a tanszék életében valamiképpen az állandóság, folytonosság érzetét kelti. Nagyon szeretjük meghallgatni visszaemlékezéseit a tanszék korábbi éveire, történéseire. Ezt kiváló emlékezőtehetsége mellett humora, jó elbeszélőkészsége is valódi élménnyé teszi számunkra. Szerénységére jellemző, hogy aktív vezetőként sosem engedte megünnepelni születés- vagy névnapját. Jelen megemlékezés ezen a mulasztáson is segíteni kíván.

Nyolcvanadik születésnapján jó egészséget, Isten áldását és további eredményes munkát kívánunk Neki.

Csikor Ferenc

60 ÉV A FIZIKA BŰVÖLETÉBEN

– 75 éves lenne Zimányi József

Ez a cikk a 75. születésnapját betöltő *Zimányi József* tiszteletére született volna, aki azonban 2006. szeptember 26-án váratlanul eltávozott közülünk. Október 20-án a Farkasréti temetőben sokan gyűltek össze a ravatalnál, hogy végső búcsút vegyenek a baráttól, kollégától, tanítótól, a köz javáért harcolótól, s mindenek előtt az „embertől”, ahogy azt *Gergő* fia mondta a sírja fölött. Az egyházi temetést celebráló *Kállay Emil*, ny. piarista tartományfőnök hűségét emelte ki: hűségét feleségéhez, *Magdá*hoz, akivel alig pár hónap múlva ünnepelték volna az aranylakodalmukat; hűségét az elveihez, amelyek visszanyúltak a piarista éveikhez, s amelyeket a legnehezebb időkben sem tagadott meg; hűségét a munkájához, kutatóintézetéhez, ahol 50 évig dolgozott. Piarista búcsúztatójának listáját egészítsük még ki azzal, hogy egész életében hűséges maradt a fizikához. Sőt, ennél sokkal többet

tett. Precíz és fáradhatatlan munkájával legkedvesebb kutatási területének, a nehézion-fizikának nemzetközileg meghatározó és elismert kutatójává vált, miközben olyan színvonalat mutatott és követelt meg környezetétől, amely törvényszerűen elvezetett ahhoz, hogy körülötte egy nemzetközi műhely, egy iskola alakulhasson ki. Mindemögött elsősorban személyisége, munkája és szakértelme, munkabírása és tapasztalata állt. Mintha el lett volna varázsolva. A fizika bűvöletében élt, és ez alól a környezete sem tudta kivonni magát. Maga köré gyűjtötte azokat, akik szintén elbűvölhetőek voltak. Aki részese akart lenni ennek a varázslatnak, azt mindig szívesen, tárt karokkal fogadta, de aki csak haszonélvezője, az hamar kívül találta magát. „Jellemes ember” volt, mondta piarista búcsúztatója. Igen, az. Ezt mi, tanítványai és közvetlen kollégái nagyon jól tudjuk.

Hogy mióta élt a fizika bővületében? Pontosán meg lehet mondani: 16 éves kora óta. *Lovas István* története szerint (akivel évfolyamtársak voltak a gimnáziumban) 1947-ben hallott a Piarista Gimnáziumban *Bay Zoltán* híressé vált Holdradar-kísérletéről, amit lelkesen magyarázott diáktársainak egy saját maga által barkácsolt készüléken a gimnázium lépcsőfordulójában. Azon gondolkozott, hogy miként tudna hasonló kísérleteket végezni. De miként szeret bele egy 16 éves diák egy fizikai kísérletbe? A pontos választ talán sohasem tudjuk meg, de biztos, hogy nem véletlen eseményről volt szó.

Zimányi József budapesti polgári családból származott. Bár nagyszülei még nagyon szegények voltak, édesapja kemény akarattal elérte, hogy felvegyék egy kereskedelmi iskolába. Így apja könyvelő, később főkönyvelő lett, önerőből felverekedte magát és családját a középosztályba. Kezdetben Pestújhelyen, később Zuglóban, a Bosnyák utcában laktak.

Az ifjú Zimányi Józsefet 1942-ben vették föl a budapesti Piarista Gimnáziumba, itt is érettségizett 1950-ben (az 1948-as államosítás után az iskolát Ady Endre Gimnáziumnak nevezték). A Piarista Gimnázium szelleme és a kiváló képességű diák hamar egymásra találtak. Jozsó kiemelkedő tanuló volt, osztályának egyik vezető egyénisége, a gimnázium cserkész közösségének meghatározó tagja. A közismert „Jozsó” becenevét gimnáziumi osztályfőnökétől, *Vékey Károly*tól kapta, ettől kezdve így szólították iskolatársai és élete végéig barátai. A KöMaL feladatait rendszeresen megoldotta, s hamar a legjobb helyezettek közé került. Otthon külön kis sarkot harcolt ki magának, ahol elektronikai bütyköléseinek élhetett. Így nem csoda, hogy a Hold-radar s a fizika felkeltette az érdeklődését. Ekkor volt vége a II. világháborúnak, s az amerikaiak atombombája tett pontot az események végére. Mi mást is akarhatott volna egy tehetséges, törekvő, technikai dolgok után érdeklődő fiatal ember, mint közel kerülni mindehhez, s részese lenni valaminek, ami izgalmas és tele van újdonsággal. Tisztelet a piarista tanároknak, hogy segítettek abban, hogy képességei kifejlődjének, s tudása, felkészültsége olyan szinten érjen el, hogy egyértelmű volt: Jozsó egyetemi szinten folytathatja tanulmányait. Szülei is sokat tettek azért, hogy gyermekeik magasabb képzettséget szerezzenek. Így családjában nővére és ő lettek az elsők, akik értelmiségi pályára mehettek. Ez nagy kihívás, egyben nagy felelősség is volt. Szüksége is volt az elhivatottságára. 1948-ban államosították a Piarista Gimnáziumot, a tanári kar nagy része lecserélődött. Az 1950-es felvételi idején polgári származása és az, hogy egyházi iskolába járt, nem a legjobb ajánlólevél volt. Mindezek ellenére a „bővület” már működött, Jozsó fizikus akart lenni. 1950-ben ennek legegyszerűbb módja a Műegyetemre való jelentkezés volt, amit be is adott időben. A felvételi papírok beadása után azonban találkozott az utcán egy volt iskolatársával, aki néhány évvel fölötté járt a piaristákhoz, s tőle tudta meg, hogy az ELTE-n is indítanak fizikus szakot, ahol inkább az alapkérdésekre fókuszálnak, mint a gyakorlati felhasználásra. Jozsó gyorsan döntött. Visszasietett a gimnáziumba, ahol egy ügyeletes tanárt rávett, hogy javítsák át a felvételi papí-

rokat úgy, hogy az ELTE-re szóljanak. Hogy ezt hogyan érte el 1950-ben, egy frissen államosított gimnáziumban, azt már sohasem tudjuk meg pontosan, de mutatja, hogy ha Jozsó valamit el akart érni, akkor attól nem lehetett eltántorítani már 18 évesen sem.

Az ELTE-n nagy fizikus évfolyamok indultak, azonban Jozsó hamar kitűnt kiváló képességeivel és felkészültségével. Évfolyamtársai őt tartották az egyik legokosabb diáknak. Az évfolyamon együtt tanult *Németh Judittal*, akit szintén a legjobbak között tartottak számon. Ő mesélte, hogy a tanulmányok elején Jozsó odajött hozzá, hogy nem ért valamit az órán elhangzottakból. Judit úgy érezte, hogy egyszerű a probléma, s lendületesen elkezdte magyarázni Jozsónak. Eközben kiderült számára, hogy valójában ő sem érti igazán a megoldást. A következő 50 évben óvatosabban bánt a Jozsó által felvetett problémákkal. Jozsóhoz és Judithhoz csatlakozott *Lovas István* is, aki szintén az évfolyam tagja volt. Így létrejöhett az a triumvirátus, amely 50 éven keresztül nagy befolyással volt a magyar magfizikára.

Az 50-es évek elején az egyetemi évek izgalmas kihívást jelentettek a frissen megalakult fizikus szakon. Az idősebb diákok tanították a fiatalabbakat, ami nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a legfrissebb tudásanyag kerüljön átadásra – ugyanakkor sok idő és energia kellett a megértésükhöz. De mindenki tanulni próbált, és másokat is próbált arra megtanítani, amit ő már tudott. Élénk volt a szemináriumi élet, a legfontosabbnak vélt tudományos cikkeket tanárok és tanítványok sokszor együtt dolgozták fel. Professzorként *Jánossy Lajos*, *Novobátzky Károly*, *Pócza Jenő* tanította őket, tankörvezetőjük *Keszthelyi Lajos* volt. Nagy hatással volt az évfolyamra fizikából *Marx György*, aki akkor fiatal tanársegéd volt, és az egy-két évvel fölöttük járó, őket demonstrátorként oktató *Györgyi Géza*, *Károlyházy Frigyes* és *Pócs Lajos*. Matematikára *Hajós György*, *Császár Ákos*, *Fuchs László* tanította őket.

A tanulás mellett azonban Jozsó, Judit és István a baráti társaságukkal együtt igyekeztek vidáman tölteni a diákéveket az 50-es évek nehéz körülményei között is. „Maga köré gyűjtötte a polgári elemeket” – állt Jozsó egyetemi káderlapján. Manapság sok fiatal nem is érti, hogy mit jelent ez a mondat.

Az évfolyam 1954-ben befejezte tanulmányait, mindenki várt egy év gyakorlat, s utána az államvizsga. Jozsó az egyetemre szeretett volna kerülni, elméleti fizikusnak, ehelyett azonban a KFKI-ba helyezték, mint kísérleti fizikust. Elektronikai ismeretei, barkácsoló kedve és kiváló tanulmányi eredménye miatt szívesen látták volna mind az Elektromágneses Hullámok Osztályon, mind a Kozmikus Sugárzás Osztályon, ő azonban a *Simonyi Károly* által vezetett Atomfizika Osztályt választotta. 1955-ben, a sikeres diplomázás után itt kapott állást és elkezdte kísérleti fizikusi pályáját. Kezdetben a fő kutatási területe a gerjesztett atommagok spinjének és paritásának vizsgálata volt. Nagyon sok radioaktív atommag β -sugárzással, azaz elektron kisugárzásával bomlik el, s egy olyan gerjesztett állapotba kerül, amelyből γ -sugárzással, azaz nagy energiájú fotonok kibocsátásán keresztül kerül alapállapotba. Legtöbbször egyetlen γ -sugárzás-

sal, de olykor kettővel. A két foton szöghorrelációjának méréséből meghatározható a gerjesztett állapot spinje és paritása. Ha több nívója van a gerjesztett atommagnak, akkor ezeket szépen sorban ki lehet mérni, és így részletes képet kaphatunk az atommag tulajdonságairól. A kísérletek látszólag egyszerűek voltak: két szcintillátorra volt szükség, amelyek egymással bezárt szögét kellett nagy pontossággal mérni.

Jozsó nemcsak a kísérletet tervezte meg pontosan, hanem külön súlyt fektetett az elméletre is. Elsajátította az impulzusmomentum kvantumelméletét, s kollégáit is megtanította rá egy szemináriumsorozaton. Kitűnő előadásokat tartott, de ezek csak a szakmailag képzett, értő közönségnek szóltak, az ismeretterjesztés voltaképpen sohasem lelkesítette.

1956 nyarán kezdtek el építeni a kutatóreaktort Csillebércen. 1960-ra készült el, ekkortól már rövidebb felezési idejű izotópok vizsgálatára is lehetőség nyílt. Jozsó érdeklődése ekkor a reaktorból kikerülő, 900 keV-ig terjedő energiaspektrumú protonok felhasználására fordult. Ezekkel a protonokkal atommagokat sugároztak be, és az így keletkezett γ -sugárzást vizsgálták. Ezek a kísérletek is hozzájárultak ahhoz, hogy a KFKI-ban megépüljön egy igazi gyorsító, egy Van de Graaff-berendezés, amellyel már MeV energiákra lehetett felgyorsítani a protonokat és a töltött atommagokat. A 60-as, 70-es években ez a Van de Graaff-gyorsító vált a KFKI-beli kutatások egyik legfontosabb eszközévé, s mind a mai napig működik, mint a kevés magyarországi nagyberendezések egyike.

Ugorjunk azonban vissza 1956-hoz. Jozsó értette és támogatta '56 eseményeit. Röplapokat gyártott és szállított. Ha egy kicsit balszerencsésebb, akkor maga is börtönben végezhetett volna. S bár '56 után nem lehetett rábizonyítani semmilyen cselekedetet, véleményét viszont vállalta. Káderlapján így újabb fekete pontok, beírások jelentek meg. Ez több mellőzéshez is vezetett a következő években. Ugyan a KFKI-ból neki nem kellett elmennie, de sokáig nem utazhatott „nyugatra”, és nem tölthetett be vezető pozíciót. Viszont a fizikának élhetett, s csak fizikai kérdésekkel kellett küzdenie a következő években.

Jozsó az *Erő János* által vezetett csoportban többek között Pócs Lajossal és *Szentpétery Imrével* dolgozott együtt. A 60-as évek elején Drezdában mértek, az ottani ciklotron mellett. Az adatfeldolgozást és az elméleti számításokat igyekezett az elérhető legjobb gépeken végezni, a számítástechnika fizikai alkalmazásának egyik hazai úttörője volt, nagyon sok gépen a legelső „user”-ek egyike. A későbbiekben is mindig támogatta a KFKI számítástechnikai háttérének fejlesztését. A 60-as évek elején kutatásai elismerést is hoztak, az ELFT 1962. évi Bródy Imre-díját Károlyházy Frigyesselel megosztva kapták. Ekkor egy kandidátusi értekezésben szerette volna összefoglalni eredményeit. A vonatkozó rendelet „C pontja” (politikai megbízhatóság) miatt azonban csak megkésve, 1964-ben tudta benyújtani majd megvédeni *Stripping-reakciót követő gamma-sugárzás cirkuláris polarizációja* című kandidátusi értekezését. A kísérletek mellett az elméleti kérdések is izgatták. Így például



Jozsó a szöghorrelációs berendezéssel a KFKI-ban 1956-ban

Bencze Gyulával együtt kidolgozták azt a statisztikus módszert, amellyel kevésbé ismert közbenső sugárzási folyamatok hatását lehetett kiátlagolni, s ezzel növelték a végállapotú sugárzás kimérésének és elemzésének hatékonyságát. Eredményeiket a *Physics Letters*-ben publikálták [1], s száznál is több hivatkozást kaptak rá, ami abban az időben óriási szakmai sikert jelentett. 1964-ben, még a cikk megjelenése előtt, *Peter E. Hodgson*, a Párizsban rendezett Nemzetközi Magfizikai Konferencia plenáris előadója külön kiemelte ezt az eredményt, amit a karzaton ülő magyar delegáció örömmel vett tudomásul. (Jozsó nem vehetett részt ezen a konferencián.) Később sokan és sokszor kérdezték, hogy mi volt a titka ennek a cikknek, miért vált ennyire sikeresé. Jozsó erről a következőképpen vallott: „Hát, mert olyan volt, mit a zsiléttpege. Nagyon egyszerű, csak ki kellett találni.” Munkásságára, fizikai gondolkodására végig jellemző volt ez a megközelítés.

Ezt a híressé vált cikket még továbbiak követték. Az atommagok optikai potenciálja és mikroszkopikus paramétereinek meghatározása témakörben elért eredményeit *A töltésfüggő kölcsönhatások szerepe a magreakciókban* című disszertációjában foglalta össze, s ezzel 1972-ben megszerezte az MTA fizikai tudomány doktora fokozatot.

Jozsó a 60-as évek közepéig csak kétszer mehetett „nyugatra”. Először egy New York melletti Gordon-konferencián vett részt, majd a francia Les Houches-ban egy téli iskolán. Pedig a magreakciók területén elért eredményei nemzetközi érdeklődést váltottak ki, és több meghívást is kapott. Így például 1963-ban, a tihanyi magfizikai konferencián *Ole Hansen* meghívta Koppenhágába. Erre az útra azonban hosszú évekig nem kerülhetett sor. Végül 1969-ben kapta meg az engedélyt, hogy ellátogasson a Niels Bohr Intézetbe. Ez az utazás meghatározó volt pályafutására.

Évről évre visszatérő vendéggé vált a koppenhágai intézetben. Kezdetben az alacsony energiás magreakciók elméletével foglalkozott, a 70-es évek közepén azonban beleszeretett a nehézion-fizikába. Ennek az új tudományágnak az egyik bölcsőjét Koppenhágában ringatták, s a bölcső fölé hajlók között ott találhatjuk Jozsót is. Nemzetközi ismertséget és elismertséget jelentősen növeli a Bon-



A Quark Matter 2006 konferencia résztvevői búcsúznak Jozsótól

dorf–Garpman–Zimányi-féle hidrodinamikai modell publikálása 1978-ban [2], amely a nehézion-ütközésben keletkező tűzgömb időbeli fejlődését írta le. Ezt követte a Montvay–Zimányi-féle hadrokémiai modell [3], amellyel a tűzgömbben végbemenő hadronikus ütközéseket sikerült nyomon követni. *Fái Györggyel* azt vizsgálták, hogy a nehézion-reakciókban létrejöhet-e a kölcsönható pionok Bose–Einstein-kondenzációja [4]. Jozsó belekóstolt az ezidőben induló biofizikai kutatásokba is, *Csernai Lászlóval* az ideghálózatok matematikai modelljének alapkérdéseit kutatták [5]. Nagyon izgalmas és tudományos szempontból nagyon termékeny időszak volt a 70-es évek vége. A nehézion-fizikában elért nagyszerű eredmények elismeréseként 1981-ben Akadémiai Díjat kapott. 1973-ban lett az Elméleti Fizikai Osztály vezetője, s 1984-ig látta el ezt a feladatot.

1986-ban keltette fel érdeklődését a New York melletti Brookhavenben működő AGS-gyorsító, ahol a kutatók atommagok ütköztetésével akarták „megolvasztani” a protonokat és neutronokat, és a kvarkanyag, pontosabban kvark–gluon-plazma létrehozásán fáradoztak. Jozsó követte az ütközési energia növekedését. Érdeklődésének fókuszába került a kvark–gluon-plazma keletkezésének és hadronizációjának kérdése, és sikeres kutatásainak eredményeként ezen területek nemzetközi szaktekintélyévé vált. A Genf melletti CERN-ben is elindultak a nehézion-kísérletek, 1986-tól kén, majd 1994-től ólom atommagokat gyorsítottak föl az AGS-nél 10-szer nagyobb energiára. Jozsó felismerte, hogy a magyar nehézion-fizikai és nagyenergiás részecskefizikai kutatásoknak elemi érdeke ezekhez a kísérletekhez csatlakoznia, mert ezekből a nagy gyorsítókból csak egy-egy van a világon, így ezek köré koncentrálódnak a legnagyobb kutatási programok. Ezért szorgalmazta az európai nagyenergiás kutatóközpontokhoz, a CERN-hez való hivatalos csatlakozást, amire 1992-ben, *Pungor Ernő* tárca nélküli miniszter, az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság elnöke irányítása mellett került sor. Jozsó 1992–2004 között a magyar CERN Bizottság tagja volt, és egyben Magyarország tudományos képviselője a CERN Tanácsban. A tudományos szervezés mellett az NA49 együttműködésnek is aktív tagja volt. A CERN-ben 2008-ban indul el az LHC-

gyorsító. Jozsó mindig is támogatta ezeket a kísérletet, kezdetben maga is tagja volt az ALICE-kísérletnek. Mindig is látta a kísérletekben rejlő óriási kutatási lehetőséget, s minden fórumon azt hangoztatta, hogy azokból nem szabad kimaradni. Csakúgy, mint a számítástechnika rohamléptű fejlődéséből, amelynek egyik motorja ismét a CERN lett a Grid-rendszerek elterjedésének szorgalmazásával. Jozsó, mint az RMKI Tudományos Tanácsának elnöke, támogatta hogy az RMKI építse ki a saját Grid-parkját, ami 2002 óta működik is.

A CERN SPS-ben 1994–2000 között folytak az ólom-ólom ütközések. Majd 2000-ben elindult a New York melletti Brookhavenben a RHIC-gyorsító. Itt az SPS-nél tízszer nagyobb energián végeztek nehézion-ütközéseket. A PHENIX-kísérletben a magyar kutatók is részt vesznek, Jozsó is tagja volt ennek a kísérletnek. Közel száz NA49-es és tucatnyi PHENIX-cikk szerzői listáján található meg a nevét. Terjedelmi okokból csak címszavakban említhetjük az elmúlt tizenöt év legjelentősebb kutatási eredményeit: a maganyag leírásának továbbfejlesztését (Zimányi–Moszkowski-modell [6]), a pionkorrelációs vizsgálatok kiterjesztését (SPACER-modell [7]), a kvark-koaleszcencia modell kifejlesztését (ALCOR-modell [8]), a különböző egyensúlyi és nem-egyensúlyi hadronizációs modellek továbbfejlesztését, a nehéz „bájós” kvarkok hadronizációban vállalt szerepének tisztázását. Elméleti munkásságát mind a magyar, mind a nemzetközi kutatóközösség elismerte. 1990-ben a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagjává, majd 1995-ben rendes tagjává választotta. A European Academy of Arts, Sciences and Humanities 1997-ben fogadta tagjai közé. 1992-ben megkapta a Magyar Köztársasági Érdemrend tisztikeresztjét. Tudományos eredményeit, iskolaalapító tevékenységét 2000-ben Széchenyi-díjjal jutalmazták.

Tudományos szervező munkássága szerteágazó volt. 1982–90 között az MTA Magfizikai Bizottságának elnöki tisztét látta el. Fő szorgalmazója volt a nemzetközi kapcsolatok kiszélesítésén munkálkodó Nemzetközi Elméleti Fizikai Műhely létrehozásának, 1984–85 között a Műhely társelnöke, 1989–92 között ügyvezető elnöke. Nemzetközi tapasztalatait a hazai kutatás szervezése területén is felhasználta. A 90-es évek elején, a magyar tudomány finanszírozásának átszervezésekor a többszörös tudománytámogatási rendszer és a titokban maradó bírálók alkalmazásán alapuló „peer review” fontosságát hangoztatta, és az amerikai NSF metódusának részbeni átvételét javasolta. Sikertörténet az OTKA alapszabályának kialakításakor ezeket a fontos módszereket beemelnie. 1991–1998 között az OTKA Élettelen Természettudományi Szakkollégium elnöke volt. Munkájának elismeréseként 1998-ban megkapta az OTKA Ipolyi Arnold tudományfejlesztési díját.

Jozsó aktív maradt nyugdíjba vonulása után is. 2005-ben az RMKI emeritus kutatóprofesszora lett, és továbbra is rendszeresen bejár dolgozni. Az utóbbi két évben legjobban az izgatta, hogy tömeges kvarkok koaleszcenciájából hogyan alakulhatnak ki a könnyű pionok és kaonok. Végül is azt a megoldást találta, hogy a kvarkok a kiszabadulásuk után, kölcsönhatásuk következtében, egy széles tömegspektrummal lesznek jellemezhetőek [9, 10]. Publikálásra készítette elő legújabb ered-

ményeit, amikor hirtelen elragadta a betegség, és már nem térhetett vissza az íróasztalához.

Jozsó munkájának és az általa alapított nagyenergiás magfizika-iskola eredményeinek sikerét, nemzetközi elismertségét mutatja, hogy 2005-ben a terület legjelentősebb eseményét, a másfél évente megrendezésre kerülő Quark Matter világkonferenciát Budapest látta vendégül, s Jozsó volt a konferencia tiszteletbeli elnöke. 600 résztvevő előtt mondta el gondolatait, ismertette legújabb eredményeit [11]. Nagyon örült, hogy a konferencia sikeresen lezajlott, s hosszú évekre megerősítette a magyar nehézion-fizikai kutatások nemzetközi pozícióit. Hirtelen halála annál nagyobb veszteség, hisz így nem láthatja a következő évek eredményeit, az LHC-kísérletek izgalmas elindulását és kibontakozását. A 2006 novemberében Shanghai-ban megrendezett Quark Matter 2006 konferencia résztvevői felállva, nagy tapsal tisztelegtek munkássága előtt, így búcsúzva a nehézion-fizikai kutatások egyik meghatározó személyiségétől.

Idehaza két rendezvénnyel kívánunk tisztelegni emléke előtt. A több éve december elején az RMKI-ban megrendezésre kerülő iskolát ez évtől *Zimányi József Nemzetközi Téli Iskolának* (angolul *Zimányi International Winter School*) nevezzük, valamint 2007 június 28–30. között Budapesten megrendezzük a *Zimányi Memorial Workshop* nemzetközi emlékkonferenciát.

Kedves Jozsó! Nyugodjál békében, emléked, tanításaid megőrizzük, a bűvöletet továbbvisszük.

Tanítványi tisztelettel,

Lévai Péter

Zimányi József a Fizikai Szemlében

Izobár analóg állapotok – 22 (1972) 282

Magfizikai aktualitások – 24 (1974) 160

Az idegrendszer matematikai modellje – 28 (1978) 295 (Csernai Lászlóval)

Neuronhálózatok önszerveződésének egy matematikai modellje – 31 (1981) 81

A relativisztikus nehezion reakciók kémiája – 37 (1987) 74

A kvarkanyag – 44 (1994) 157 (Csörgő Tamással, Lévai Péterrel, Lukács Bélával)

Irodalom

1. GY. BENCZE, J. ZIMÁNYI: *Analytical treatment of the DWBA stripping matrix element with finite range interaction* – Physics Letters 9 (1964) 246
2. J.P. BONDORF, S.I.A. GARPMAN, J. ZIMÁNYI: *A simple analytic hydrodynamic model for expanding fireballs* – Nuclear Physics A296 (1978) 320
3. I. MONTVAY, J. ZIMÁNYI: *Hadron chemistry in heavy ion reactions* – Nuclear Physics A316 (1979) 490
4. J. ZIMÁNYI, G. FÁI, B. JAKOBSSON: *Bose-Einstein condensation of pions in energetic heavy ion collisions?* – Physical Review Letters 43 (1979) 1705
5. L.P. CSERNAI, J. ZIMÁNYI: *A mathematical model for the self-organization of neural networks* – Biological Cybernetics 34 (1979) 43
6. J. ZIMÁNYI, S.A. MOSZKOWSKI: *Nuclear equation of state with derivative scalar coupling* – Physical Review C42 (1990) 1416
7. T. CSÖRGŐ, J. ZIMÁNYI, J. BONDORF, H. HEISELBERG: *Birth of hot matter in relativistic heavy ion collisions* – Physics Letters B222 (1989) 115
8. T.S. BIRÓ, P. LÉVAI, J. ZIMÁNYI: *ALCOR: A dynamical model for hadronization* – Physics Letters B347 (1995) 6
9. J. ZIMÁNYI, P. LÉVAI, T.S. BIRÓ: *Properties of quark matter produced in heavy ion collision* – Journal of Physics G31 (2005) 711
10. T.S. BIRÓ, P. LÉVAI, P. VÁN, J. ZIMÁNYI: *The mass distribution of quark matter* (hep-ph/0606076)
11. J. ZIMÁNYI: *Evolution of the concept of quark matter: The Ianus face of the heavy ion collisions* – Nuclear Physics A774 (2006) 25

A FIZIKA TANÍTÁSA

FIZIKAI MÉRÉSEK ÚTKÖZBEN

Görbe László, Piarista Gimnázium, Budapest

Nyerges Gyula, Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Informatikai Szakközépiskola, Dorog

Sebestyén Zoltán, Pécs

Simon Péter, Leőwey Klára Gimnázium, Pécs

Ujvári Sándor, Láncoz Kornél Gimnázium, Székesfehérvár

2006-tól a CERN nemzeti tanárképző programot indított, melynek keretében a különböző országokból érkező csoportok anyanyelvükön hallhatnak részecskefizikai előadásokat. Európában elsőként, augusztus 20. és 26. között a magyar fizikatanárok 38 fős csoportja (Hungarian Teachers Programme 2006) élt ezzel a lehetőséggel. A *Fizikai Szemle* idei szeptemberi számában beszámoltunk az egyhetes program szakmai és kulturális élményeiről.

Ha sok fizikatanár van együtt, nemcsak beszélgetnek a fizikáról, tanításról, hanem szívesen végeznek kísérletet vagy mérést is. Az egyhetes tanfolyam során négyféle mérést végeztünk szabadidőnkben. A mérések előkészítéséért külön köszönet illeti a tanulmányutat is szervező *Sü-*

kösd Csabát. Ő vetette fel azt a gondolatot is, hogy az út során méréseket végezzünk, és megbízta az ezekért felelős kollégákat: a földrajzi helymeghatározásért *Nyerges Gyulát*, a háttérsugárzás méréséért *Ujvári Sándort*, a víz forráspontjának méréséért *Görbe Lászlót*, a légnyomás méréséért pedig *Sebestyén Zoltánt* és *Simon Pétert*.

Földrajzi helymeghatározás

Manapság, a műholdas navigációs rendszerek korában természetesen tűnik, hogy tudjuk, éppen merre járunk. Néhány évszázaddal ezelőtt azonban az utazóknak iránytű



1. ábra. A szélességi kör meghatározása délben, szögmérővel



2. ábra. A delelés időpontjának meghatározása

és csillagászati mérőműszerek segítségével kellett meghatározniuk földrajzi pozíciójukat. Ezen múlt útjuk sikere, de sokszor az életük is. A mérések egyszerű eszközökkel is elvégezhetőek – természetesen kisebb pontossággal. Ezeket a méréseket végeztük el a szertárban fellelhető eszközök felhasználásával Budapest határában, röviddel indulásunk után. A földrajzi szélesség meghatározása az egyszerűbb feladat, csupán egy szögmérő és egy függőn (esetünkben ez egy zsinigre kötött anyacsavar volt) kell hozzá. A méréshez nagy méretű, táblai szögmérőt használtunk, középpontjára már előre rögzítettük a függőt, így ha a szögmérőnk függőleges síkban áll, a zsineg mutatja az egyenes él függőlegestől mért eltérését (1. ábra). Nincs más dolgunk, mint a műszer élét a Nap felé irányítani. Vetítőernyőt helyeztünk a szögmérő mögé, és csúcsainak (az egyenes él végpontjai) árnyékát figyelve mozgattuk a szögmérőt. Ha a két pont árnyéka egybeesik, az él éppen jó irányba mutat, és a skáláról leolvashatjuk a Nap zenittávolságát. A mérést célszerű a tavaszi vagy az őszi napforduló idejére időzíteni, ekkor ugyanis a Nap éppen az égi egyenlítőn delel, a leolvasott szög ilyenkor a földrajzi szélességünkkel egyenlő. Az év más napjain sajnos bonyolultabb a helyzet, ilyenkor ismernünk kell a Nap deklinációját (egyenlítő fölötti/alatti látószögét) és ezt az értéket hozzá kell adnunk mérési eredményünkhöz. Utunk során mi is így jártunk el, a kérdéses szöveget a *Csillagászati Évkönyv* táblázatából nyertük. A másik szükséges adat a Nap delelési időpontja, ennek meghatározásához viszont szükségünk van a földrajzi hosszúságra. Ennek hiányában folyamatosan kell a mérést végeznünk, és azt az adatot kell felhasználnunk, amikor a legmagasabbra hágott a Nap útja során. A delelés környékén szerencsére a Nap a horizonttal párhuzamosan jár, így a mérés nem érzékeny az időpont pontos meghatározására. A delelés bekövetkezését egy iránytű segítségével is meghatározhatjuk, mint később látni fogjuk, ezt a módszert követtük mi is. A szögmérő fokos beosztással bír, ez határozza meg mérésünk pontosságát. A szögmérő segítségével a Nap zenittávolságát 36° -nak mértük, ezt korrigálva a Nap 12° -os deklinációjával 48° -os szélességet kapunk.

A földrajzi hosszúság meghatározása lényegesen bonyolultabb feladat, először az észak–déli irányt kell kitzűnünk. Vízszintes papírlapon rajzoljunk É–D-i vonalat iránytű segítségével! (Mi előre megrajzoltuk a vonalat, és

tájolóval forgattuk a lapot a megfelelő irányba.) A vonal déli végére állítsunk függőleges pálcát! (Esetünkben ez egy átfúrt fakorongba helyezett ceruza volt, de a rögzítés készíülhet gyurmából is.) Mind a vízszintes, mind a függőleges irányt ellenőrizzük vízmérték segítségével!

(Lényegesen pontosabban is kitzűzhetjük az É–D-i irányt indiai kör segítségével: Rajzoljunk kört a függőleges pálcá talppontja köré, majd jelöljük meg azt a két pontot, ahol a pálcá végének árnyéka délelőtt, illetve délután áthalad rajta! A két pont éppen K–Ny-i irányt határoz meg, erre kell merőlegest szerkesztenünk a talpponton keresztül. Utazók lévén mi a gyorsabb, tájoló megoldást választottuk.)

Ezután azt kell megmérnünk, hogy a pálcá árnyéka mikor halad át a vonalon. Az év négy napján (április 15., június 13., szeptember 1., és december 25.) a Nap éppen délben delel, ekkor célszerű ezt a mérést elvégezni. Augusztus lévén a mi mérésünket az időegyenlet aktuális értékével korrigálni kellett. (Az időegyenlet grafikonja megtalálható többek között a *Távcső világa* című kötetben is.) Azt kell megállapítanunk, hogy a delelés hány perccel később (nyugati féltekén korábban) következik be a világidő szerinti (greenwichi) délnél. (Hazánkban 1, nyári időszámítás idején 2 órával mutatnak többet az órák.) Az eredményt 4-gyel osztva (4 perccenként tesz meg 1 fokot a Nap égi útján) megkapjuk a keresett hosszúságot. Ennél a mérésnél a legnagyobb bizonytalanságot a délvonal kitzűzése okozza, hiszen tájolóval pusztán 1–2 fok pontossággal tudjuk beállítani az É–D-i irányt. További hibaforrás a lap vízszintes és a pálcá függőleges iránytól való eltérése, valamint az időpont leolvasási bizonytalansága. A halmozott hibák akár 5–6 fokos eltérést is okozhatnak. Megmértük a pálcá magasságát (189 mm) és az árnyék hosszát (142 mm) is a deleléskor (2. ábra). A két adat ismeretében tangens táblázat segítségével szintén meghatározható a Nap delelési magassága ($\sim 37^\circ$), ebből pedig az észlelőhely földrajzi szélessége (49°) is. A Nap delelése 12:40 (10:40 UT) körül következett be. Mintegy 80 perccel dél előtt. Ezek szerint a 20. keleti hosszúság körül mértünk. (A valódi koordináták: $47^\circ 28'N$ és $18^\circ 52'E$ voltak.)

Ez a kísérlet nem igényel túl nagy előkészületet, viszont szabadban, osztálykirándulás során akár több, egymással versengő csoportban is elvégezhető. Azt a csoportot, ame-

lyik a legjobb eredményt éri el, valamilyen jutalomban is részesíthetjük. A tanulók motiváltságát, és a Természethez „fizikusi” szemmel való hozzáállását erősítheti.

Víz forrásponjtjának mérése

Mint tanulmányainkból tudjuk, a víz forrásponjtja függ a külső nyomástól. Ezt kísérlettel igen könnyű igazolni. Sokáig forraljunk lombikban vizet, majd dugaszoljuk le és kezdjük vízzel locsolva hűteni. A megjelenő buborékok jelzik, hogy a víz újra forr. Ebben az állapotban nehéz megmérni a víz hőmérsékletét, bár biztos, hogy kevesebb, mint 100 Celsius fok. Ha a tengerszint feletti magasság nő, akkor csökken a légnyomás, s így a víz forrásponjtjának értéke is változik. A CERN-ben eltöltött tanulmányút alkalmat adott ennek tanulmányozására. Mivel különböző magasságokban voltunk, így több magasságban is – borszeszhőmérő és elektromos hőmérő, gázmelegítő, csapvíz és ásványvíz felhasználásával – megmértük a víz forrásponjtját (3. ábra).

Eredmények

A kapott eredményeket az 1. táblázat tartalmazza. Az alkoholos hőmérő (ami biztonságosan szállítható volt) szerint nem sokkal a tengerszint felett 96 fokon forr a víz. Ahogyan egyre magasabbra megyünk, úgy csökken a forrásponjt. (A hegyre ugyanazt a csapvizet vittük, amivel lent a mérést végeztük). Érdekes, hogy a CERN-ben ivóvízként szolgáló víz forrásponjtja alacsonyabb, mint a csapvízé.

Levonható következtetések

1. A mérési bizonytalanságot itt már növelheti az, hogy nem a teljes hőmérő volt a vízben.

2. A forrásponjt meghatározása nem volt olyan pontos (és közben más okok miatt is változhatott a légnyomás), hogy a tengerszint feletti kis magasságváltozásokat is érzékelni tudjuk.

3. ábra. Mérés a parkolóban, forr a víz



1. táblázat

A víz forrásponjtja különböző tengerszint feletti magasságokban

időpont	helyszín	magasság	víz	forrásponjt borszeszhőmérővel	forrásponjt elektromos hőmérővel
augusztus 28.	Budapest	110 m	csapvíz	96 °C	–
augusztus 25.	CERN	530 m	csapvíz	96 °C	–
augusztus 25.	CERN	530 m	ásványvíz	94 °C	–
augusztus 26.	Chamonix	1020 m	csapvíz	92 °C	94 °C
augusztus 28.	Mont Blanc	3840 m	csapvíz	84 °C	86 °C

3. Arra a napra, amikor a Mont Blanc-on jártunk, ciklon érkezését jelezték, s ez délután meg is érkezett. Ez is befolyásolhatta a légnyomást, és csökkenthette a víz forrásponjtját.

4. A víz forrásponjtjának változása a magassággal talán több kísérletet is megérdemelne.

A légnyomás mérése

A pisai kertészek a következő problémával fordultak annak idején *Galilei*hez: szárazság idején azt tapasztalták, hogy a szívó-nyomó kutak segítségével nem lehet a vizet a kútból 10 méter fölé emelni. Az idős tudós egyik kedvenc tanítványának, *Torricelli*nek adta át a problémát megoldásra. A jelenség magyarázatának keresése közben a fiatal tudós, *Viviani* segítségével megmérte a légnyomás értékét. Az iskolákban ma is szívesen tanított kísérlet szerint a légnyomás körülbelül 76 cm magas higanyoszloppal tart egyensúlyt, ami körülbelül 10 méter magas vízoszlop nyomásának felel meg. A tanulmányút során két alkalommal mértük meg a légnyomást, persze, vizet használva. A mérések elvégzésére természetesen csak úgy kerülhetett sor, hogy még otthon gondosan előkészítettük, s kipróbáltuk azokat. Félvödörnyi vízbe 11 méter hosszú, vastag falú, 1 cm átmérőjű átlátó műanyagcsövet tekertünk fölről lefelé. Eközben a cső megtelt vízzel. A csövet lejtősen és lassan kellett a víz alá tolni, hogy ne kerüljön bele buborék, ezután a cső felső végére a víz alatt egy körülbelül 30 cm hosszú, egyik végén lezárt és vízzel teletöltött üvegcsövet szorítottunk, s elkezdtük emelni. Egy bizonyos magasság elérésekor a víz a cső végénél gyöngyözni, majd hevesen buborékolni kezdett. Ezt igen tisztán lehetett látni az üvegcsövecskében. (Műanyagcsőben nem látszik ilyen szépen a jelenség!). Érdekes volt megfigyelni az alacsony (16 °C, ill. 3 °C) hőmérsékletű forrást, mely a cső felső részében uralkodó alacsony nyomásnak volt köszönhető. Ekkor egy picit vártunk, hogy a vízben oldott gázok kiforjanak a vízből. Ez alatt egyre lejjebb került a csőben a vízszint. Most elszorítottuk hermetikusan egy pillanatszorítóval a vízszint alatt 1–2 cm-rel a műanyagcsövet, s megint emeltünk rajta. Ez a trükk sokat javított a mérés pontosságán. Most már megmérhettük a vízoszlop magasságát. A mérés elvégzésében a csoport lelkesen segített kettőnknek.



4. ábra. Mérés a 38-as épület tüzlépcsőjén

1. mérés

2006. augusztus 25-én 8 órakor a CERN meyrini campusa 38-as épület külső lépcsőházában (4. ábra), a tengerszint feletti magasság 426 m (± 10 m), hőmérséklet $+16^\circ\text{C} = 289$ K. Mért érték: $h = 928$ cm.

Értékelés: Az első gondolatunk az lehet, hogy ez az érték jelentősen eltér a fizikaórákról ismert tíz métertől. (Nálunk volt egy még otthon hitelesített Fischer márkájú barométer, ami 982 kPa-t mutatott. Ez valóban 10 méter magas vízoszlop nyomását jelenti.) Ne felejtjük el, hogy a vízoszlop felett most nem a higany esetében jelen levő Torricelli-űr (10^{-3} torr) van jelen, hanem telített vízgőz. 16°C hőmérsékleten a telített vízgőz nyomása körülbelül 1700 Pa, ami 17,3 cm magas vízoszlopnak felel meg. Az így mért érték 5,5%-kal van a barométer által jelzett érték alatt. A hiba több forrásból is származhat. Egyrészt a csőben minden bizonnyal maradt még némi levegő, másrészt a hosszúság mérése is igen pontatlan volt.

2. mérés:

2006. augusztus 26-án 12 órakor 3842 m tengerszint feletti magasságon: a Mont Blanc Aiguille du Midi csúcán (5. ábra). A levegő hőmérséklete $+2^\circ\text{C} = 275$ K. Mért érték: $h = 636$ cm. Hőmérsékletváltozás: $14^\circ\text{C} = 14$ K.

Értékelés: A nálunk lévő barométer ilyen alacsony légnyomást már nem képes mérni, ezért a barometrikus magasságformulát hívom segítségül.

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho g h}{p_0}}$$

A p_0 értékének az előző napi, a campuson műszerrel mért értéket veszem, $p_0 = 982$ hPa. A magasság, $h = 3842 - 426$ m = 3416 m, a levegő sűrűsége, $\rho = 1,3$ kg/m³, $g = 9,81$ m/s². A barometrikus magasságformula ugyan állandó hőmérsékletű gázoszlopra szól, most mégis használhatjuk jó közelítésnek, hisz a hőmérsékletváltozás 5% alatt van.

Ezek után a formula alkalmazásával $p = 630,2$ hPa, ami 642 cm vízoszlopot jelent. A számolt és mért érték közötti 6 cm eltérés 1%-nál kevesebbet jelent. Ez zavarba ejtően



5. ábra. Torricelli-mérés 3842 m magasan

pontos érték. (Ha figyelembe vesszük a $+2^\circ\text{C}$ -hoz tartozó telített vízgőz nyomását, ami körülbelül 7 cm, akkor igazán elégedettek lehetünk.)

Háttérsugárzás mérése

A magyar fizikatanárok CERN-beli továbbképzése során az előre meghatározott program szerint gammadózisjelző mérést is végeztünk. A mérési adatokat az oda-és visszaúton, valamint Meyrin városában, a CERN székhelyén vettük fel (2. táblázat). A dózisteljesítmény hely szerinti változását regisztráltuk. GPS segítségével határoztuk meg a földrajzi koordinátákat és a tengerszint feletti magasságot. Másik műszerünk egy dózisteljesítmény-mérő volt, amelyik indítás után folyamatosan, másodpercenként mintát véve azonnal kiírta az eredményt.

Az utazás során a helyszínek többségét a véletlen döntötte el, ott mértünk, ahol a csoport pihenőt tartott. Az általunk választott hely pedig a CERN telephelye és a Mont Blanc egyik csúcsa, az Aiguille du Midi volt.

A mérés módszerét meghatározta az, hogy az alacsony intenzitású háttérsugárzásból jött beütésszámok statisztikus fluktuációja nagy, és ezért a műszer kijelzése is állandóan ingadozott. A digitális kijelzés átlagát nehéz lett volna meghatározni, ezért minden helyszínen 5 percig bekapcsolva tartottuk a műszert, és az ezen idő alatt mutatott *maximális* értéket tekintettük eredménynek. A mérés alapján a dózisteljesítmény összefüggést mutat a tengerszint feletti magassággal. Minél magasabban végeztük a mérést, annál nagyobb volt a dózisteljesítmény, ami a kozmikus sugárzás értékének növekedését jelenti. A mérések kis száma természetesen nem engedi meg túl messzemenő következtetések levonását. A program részeként többek között meglátogattuk az Atlas-kísérlet helyszínét, ahol egy 60 m mély alagútban lehetett volna mérést végezni, de a műszert a szállodában felejtettük. Itt a mélyben érdekes lett volna megmérni az árnyékolás hatását, de ez sajnos a mérést végző hibájából elmaradt. Amit sikerült megadni:

a genfi emberek egy évben átlagosan 8 mSv dózist kapnak, míg az alagútban dolgozó magyar fizikus személyi dozimétere 6 mSv-et mutatott az egész évre átszámolva. Ezt az elmaradt, alagútbeli mérést a következő csoportnak érdemes lesz elvégeznie.

A CERN-i tanulmányút során végzett mérések mindegyikének megvolt ugyan a kijelölt felelőse, mégis a csoport minden tagja aktívan részt vett a megvalósításukban. A fent leírt mérések elvégzése önmagában is örömet okozott mindannyiunknak, és ötleteket, bátorítást adott ahhoz, hogy diákjainkkal is elvégeztessük ezeket szakkörök, osztálykirándulások alkalmával. Hiszen mérni jó, és a Természet ezernyi érdekes, mérni való jelenséget kínál.

2. táblázat

Háttérsugárzás mérése						
helyszín	koordináták			2006. augusztus		mért érték (nSv/óra)
	északi szélesség	keleti hosszúság	tengerszint feletti magasság	nap	óra:perc	
Bp., Hősök tere	47° 32'	19° 05'	117 m	19.	11:45	86,6
Bp.-dél parkoló	47° 25'	18° 55'	125 m	19.	13:00	111,5
Parkoló	48° 04'	16° 03'	362 m	19.	16:40	79,5
Parkoló Salzburg előtt	47° 50'	13° 01'	511 m	19.	20:40	107
Salzburg	47° 48'	13° 25'	408 m	19.	23:00	84
Winterthur	47° 31'	8° 44'	460 m	20.	6:50	75
Montreaux	46° 24'	6° 55'	459 m	20.	12:15	82
Parkoló Genf mellett	45° 55'	6° 40'	560 m	26.	9:50	160
Aiguille du Midi	45° 55'	6° 50'	3800 m	26.	12:10	340
Chamonix, félúton Aiguille du Midi felé	45° 55'	6° 40'	2317 m	26.	13:15	270
Chamonix	45° 50'	6° 51'	1030 m	26.	14:00	220

Módszer: öt perc mérési idő alatt tapasztalt maximum a mért érték

ELSŐ ÉVES BSC HALLGATÓK FIZIKATUDÁSA

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kara már évek óta szélesre tárja kapuit a tanulni vágyó fiatalok előtt. Sok hallgatót veszünk fel. Az évek során azonban az a tapasztalat szűrődött le, hogy a felvettek közül nagyon sokan már az első félévi tanulmányi feladataikat sem tudják teljesíteni. Azért, hogy minél több hallgató fejezhesse be eredményesen tanulmányait, a Fizikai Intézet úgy döntött, hogy az adott szak szempontjából fontos, a középiskolában is tanult tantárgyakból szükség szerint felzárkóztató kurzusokat szervez (matematika, fizika, kémia). Azt, hogy a hallgatók közül kiknek kell részt vennie a „bevezető fizikának” nevezett kurzuson, egy, a tanév elején megíratott felmérő dolgozat alapján döntöttük el. E kurzusok meghirdetése rendkívül fontos az *esélyegyenlőség* biztosítása szempontjából, hiszen a hallgatók sokféle, különböző iskolából, iskolatípusból jöttek, nem azonos ideig tanulták a fizikát, nem azonos szinten stb. Viszont szeretnénk, ha mindezek ellenére azonos eséllyel indulnának a diploma megszerzésére. A hallgatók minden, az első évfolyam számára meghirdetett tantárgyat felvesznek, a felzárkóztatás pluszfoglalkozást jelent számukra.

Írásunkban a fizikára, a környezet- és a földtudományra jelentkező hallgatók fizikatudásával, a felmérő dolgozat alapján kapott eredményekkel fogunk foglalkozni, néhány jellegzetes összefüggést kiemelni, következtetést megfogalmazni. A feladatonkénti részletes kiértékelés honlapomon megtalálható: <http://members.iif.hu/rad8012/>.

127 fizika BSc szakos, 50 környezettudomány BSc szakos és 88 földtudomány BSc szakos elsős hallgató írta meg a dolgozatot, összesen 265 fő. Következtetéseink levonásához ez, természetesen, nem tekinthető reprezentatív mintának, de a kapott eredményeket jelzésértékűnek tekinthetjük.

A hallgatók a dolgozatot két napon írták, ezért két, gyakorlatilag teljesen egyenértékű feladatsort állítottunk össze. A maximálisan elérhető pontszám mindkét dolgozat esetében nyolcvan pont volt. A fizikán negyven pont alatti eredménnyel, míg a földtudomány és a környezettudomány esetében harminckettő pont alatti teljesítmény esetében köteleztük a hallgatókat a felzárkóztató foglalkozásokra.

A dolgozat szerkezete

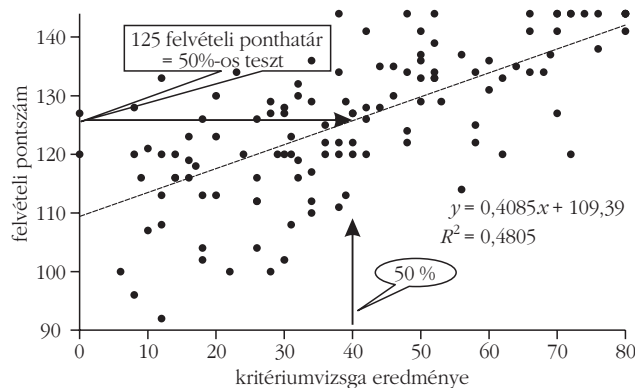
A dolgozat első része

– Egyszerű törvények, összefüggések felírása (5 darab), 10 pont.

– Teszt jellegű feladatok (15 darab), kétfelé bontva, maximálisan 30 pont.

Ezekből 7 kérdés mértékegységekre (T1–T7), illetve nagyságrendekre kérdezett rá, 8 volt hagyományos teszt (T8–T15).

Tehát a dolgozat első fő részére összesen 40 pontot lehetett szerezni.



1. ábra. A felvételin elért pontszám és a kritériumvizsgán elért eredmény

A dolgozat második része

– 3 darab számításos feladat volt, összesen 40 pontért (12+12+16 pont).

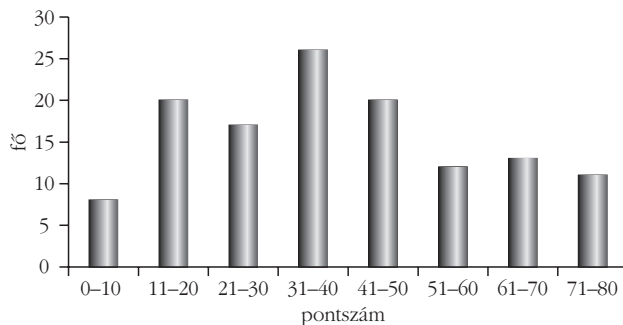
Az első feladat a mechanika témaköréből került ki, a második az elektromosságtan, a harmadik pedig kicsit összetettebb volt, megoldása mechanikai és elektromosságtani ismereteket is igényelt. A dolgozatok elkészítése során függvénytáblázatot nem lehetett használni, számológépet igen.

Fizika BSc eredmények

A fizika BSc-s hallgatók esetében a felmérésnek két célja is volt. Nemcsak azokat a hallgatókat szerettük volna kiválasztani, akiknek felzárkóztatásra van szükségük, hanem azokat is, akikkel tehetséggondozás jellegű keretek között lenne érdemes foglalkozni. Ezért a 3. feladat komplexebb problémamegoldást igényelt.

A felvett hallgatók átlagos pontszáma 124 volt, 12,5 pont szórással. 144 pontos 12 fő, 100 alatti pontszámmal hárman kerültek be.

A felvételi pontszámokat és az elért eredményeket ábrázolva arra egyenest illesztettünk (elég gyenge, 0,45-ös érték adódik a korrelációra). A felvételi pontszámokat és a felmérő dolgozaton elért eredményeket (ez utóbbiakat felszorozva 1,8-del) *t*-próbának alávetve szignifikáns különbség van a két értéksor között! Ezt úgy értjük, hogy például a 144 ponttal bekerült hallgatónak 80-ra, illetve $80 \times 1,8 = 144$ -re kellett volna teljesítenie. De, esetenként, nagyon nagy különbség tapasztalható.



2. ábra. A kritériumdolgozaton elért pontszámok eloszlása a fizika BSc-s hallgatók esetében.

Az 1. ábrán egy pont általában egy hallgatót jelent, de például éppen a 144 (felvételi) pontos hallgatók közül négyen írtak 80 pontos, azaz maximális dolgozatot, így az ő esetükben a négy pont azonos helyre került. (Az ötödik 80 pontos hallgató 141 felvételi ponttal került be a szakra.)

A 3. feladattal mindössze öten foglalkoztak azok közül, akiknek felzárkóztatóra kell járni – pár pontot értek el (1. táblázat). A másik csoportban (akiknek eredményük alapján nem kell felzárkóztató kurzusra járni) több 16 pontos megoldás volt, összesen 17. Azt gondoljuk, hogy a felmérővel sikerült mindkét célkitűzést megvalósítanunk: a felzárkóztatásra szoruló hallgatókat és a tehetséggondozásra érdemeseket is kiválasztani (2. ábra).

Azok közül, akiknek felzárkóztatóra kell járnia, sokan nem érettségiztek fizikából, de van köztük olyan hallgató is, aki közép- vagy emelt szinten érettségizett. Versenyen általában nem szerepeltek, illetve aki netán igen – saját bevallásuk szerint –, nem értek el semmiféle említésre méltó eredményt.

Földtudomány BSc eredmények

A felvételi ponthatár 123 volt. A dolgozatok átlaga 21 pont, szórással 13 pont. 88 fő írta meg. Felzárkóztató foglalkozásra kell járnia a dolgozat alapján 76 főnek (2. táblázat, 3. ábra).

A legjobb dolgozat pontszáma: 68. Mindössze 1 fő érettségizett középfokon, azok közül, akiknek kell felzárkóztatóra járnia. A többiek nem érettségiztek fizikából. Emelt szinten senki sem érettségizett.

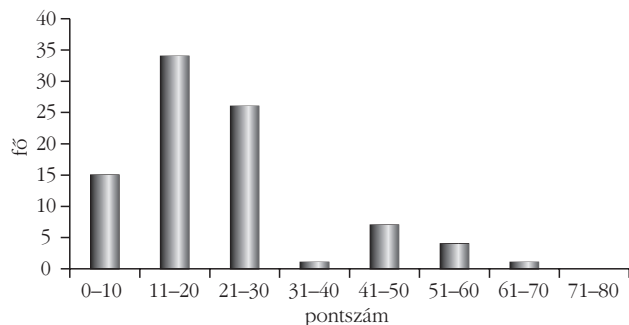
1. táblázat									
Fizika BSc-s hallgatók által elért eredmények összesítő táblázata, százalékban									
	képletek 10 pont	T1–T7 14 pont	T8–T15 16 pont	1. rész 40 pont	1. példa 12 pont	2. példa 12 pont	3. példa 16 pont	2. rész 40 pont	összesen 80 pont
összesen 127 fő	55	63,6	58,6	60	70,3	28,9	25	40	50
felzárkóztatóra kell járnia, 67 fő	30,3	50,7	41,8	42,1	45,5	8,6	1,1	16,7	30
nem kell felzárkóztatóra járnia 60 fő	83,0	79,1	79,0	80,0	98,5	53,1	54,8	73,7	73,7

A százalékos értékek úgy keletkeztek, hogy kiszámoltuk, mennyi pontot lehetett volna abban az elemben összesen elérni az arra a kérdésre válaszoló hallgatóknak, és ehhez képest összesen mennyit értek el, majd a kettő hányadosát képezve szoroztuk 100-zal.

Földtudomány BSc-s hallgatók által elért eredmények összesítő táblázata, százalékban

	képletek 10 pont	T1–T7 14 pont	T8–T15 16 pont	1. rész 40 pont	1. példa 12 pont	2. példa 12 pont	3. példa 16 pont	2. rész 40 pont	összesen 80 pont
összesen 88 fő	25,6	53,1	51,3	45,5	11,6	10,4	2,7	8,5	27,0

Magyarázat megtalálható az 1. táblázatnál.



3. ábra. A kritériumdolgozaton elért pontszámok eloszlása a földtudomány BSc-s hallgatók esetében.

Környezettudomány BSc eredmények

A felvételi ponthatár 119 volt. A felmérő dolgozat teljesen azonos volt a földtudomány esetében írttal. 50 fő írta meg. A dolgozatok átlaga: 20 pont, szórás 13 pont. Felzárkóztató foglalkozásra kell járnia 41 főnek (3. táblázat, 4. ábra).

A legjobb dolgozat pontszáma: 57 pont. 7 fő érettségizett középszinten fizikából, akik közül csak 2 főnek kell felzárkóztatóra járnia, a többiek nem érettségiztek. Emellett szinten ketten érettségiztek, egyiknek sem kell felzárkóztatóra járnia.

Néhány általános megállapítás

A 265 hallgató közül a képleteket, összefüggéseket igénylő táblázatot összesen 96 (16 fizika, 46 földtudomány és 34 környezettudomány) egyáltalán nem töltötte ki, tehát a felmérésben részt vett hallgatók 36,3%-a. Ennek alapján megállapítható, hogy a hallgatók több mint harmada nem ismer a fizikával kapcsolatban egyetlen fontos képletet, összefüggést sem!

Feladatmegoldásban is nagyon gyenge eredmények születtek. Egyedül a fizikaszakosok esetében, a mechanika típusú feladat megoldása volt viszonylag eredményes. Az elektromosságtannal kapcsolatos tesztjellegű kérdések, feladatok különösen rosszul sikerültek.

Következtetéseink:

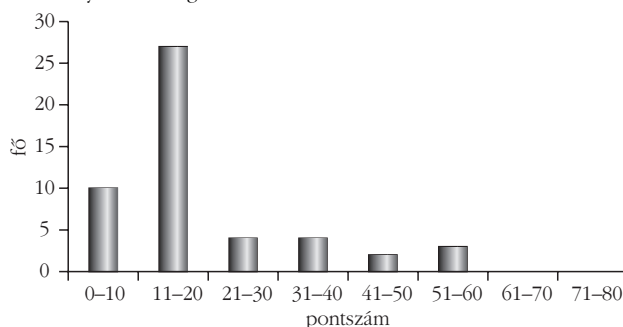
1) Akik nem tanultak fizikát a 12. évfolyamon, nem jártak fizikafakultációra, nem érettségiztek a tantárgyból akár emelt, akár középszinten, azoknak kiesett egy év a fizikatanulmányokból, és nagyon sokat felejtettek.

2) A felvételi pontszám nem csak a fizikatudást tükrözi, hanem, mint tudjuk, sok részből tevődik össze, például nyelvvizsgákkal is sok pluszpont szerezhető. Továbbá, a természettudományi szakok esetében a felvételi pontszámításnál elfogadják a középszintű érettségit, illetve nem csak a választott szakból, hanem bármilyen más természettudományos tantárgyból szerzett érettségit is.

3) Elsősorban azoknál a szakoknál, ahol a fizika „segéd tudományként” szerepel, jól megfigyelhető, hogy a hallgatók már a középiskolás koruk alatt teljesen elhanyagolták a nem szakirányú tantárgyak tanulását, esetünkben környezettudomány-, földtudomány szakosok a fizikát.

4) Sem a szülők sem a középiskolai tanárok nem világosítják fel a tanulókat arról, hogy nem csak a szűken vett választott szakirányt kell tanulni, például a földtudományhoz csak a földrajzot, hanem a tudományág műveléséhez szükséges segéd tudományokat is, fizikát, kémiát, matematikát. Sőt, általános tapasztalat, hogy inkább még le is beszélnek a nem a választott szakterülethez tartozó vagy nem érettségi tantárgy komolyabb tanulásáról a diákokat, hogy idejüket csak arra fordítsák, ami a fő szakjuk lesz, vagy választott érettségi tantárgy. A különböző felsőfokú képzések esetében szerzett tapasztalatok alapján elmondhat-

4. ábra. A kritériumdolgozaton elért pontszámok eloszlása a környezettudomány BSc-s hallgatók esetében.



3. táblázat

Környezettudomány BSc-s hallgatók által elért eredmények összesítő táblázata, százalékban

	képletek 10 pont	T1–T7 14 pont	T8–T15 16 pont	1. rész 40 pont	1. példa 12 pont	2. példa 12 pont	3. példa 16 pont	2. rész 40 pont	összesen 80 pont
összesen 50 fő	18,4	50,6	47,0	41,1	12,0	8,8	1,0	7,4	24,3

Magyarázat megtalálható az 1. táblázatnál.

juk – a sikertelen vizsgák elemzése is azt mutatja –, hogy a hallgatók nem elsősorban a választott tudományág tantárgyaiból buknak meg, hanem az adott szak sikeres elvégzéséhez nélkülözhetetlen segéd tudományokból.

5) A NAT bevezetésével, és a különböző tantervi modernizációs folyamatok eredményeképpen radikálisan (jó esetben is 40%-kal) csökkent a fizika óraszámja a közoktatásban, ezáltal a tantárgy megbecsültsége is. Ugyanakkor a tananyag mennyisége gyakorlatilag változatlan maradt, és ez a helyzet diáknak, tanárnak egyaránt megoldhatatlan, kudarcokkal teli szituációkat generál. Az egyetemek ezt a megváltozott helyzetet nem veszik és nem is vehetik figyelembe képzési programjaik tervezésénél, márpedig ténykérdés, hogy, átlagosan, kevésbé felkészült diákok jelennek meg a felsőoktatásban. A „követelményekhez” igazodva, egyetemi diplomát nem adhatnak kevesebb tudásra!

6) Az óraszámok csökkentésével csökkent a természettudományos ismereteket igénylő szakmák megbecsültsége is, így az ilyen pályákra, sajnos, nem a legtehetősebb diákok jelentkeznek.

7) Sokan valószínűleg nem vették igazán komolyan a dolgozatot, és csak az eredmény után döbbsentek rá a következményére, hogy járniuk kell a felzárkóztató foglalkozásra, és majd újabb dolgozatot kell írniuk.



Az írásunk alapjául szolgáló felmérő dolgozat az ELTE Fizikai Intézetében készült, de nagy valószínűséggel az ország bármely hasonló egyetemén és szakján hasonló eredményeket kaptunk volna. Ezt a feltevést erősíti – és arra utal, hogy az iskolai kémiaoktatás hasonló problémákkal küzd –, hogy egyetemünkön a kémiaszakon is hasonló eredmények születtek.

KÖNYVESPOLC

E.F. Taylor, J.A. Wheeler: TÉRIDŐFIZIKA

Typotex Kiadó, Budapest, 2006

Képzeljünk el egy nyelvkönyvet, amely különféle játékokat mutat be, amelyek követéséhez meglepően kevés idegen szóra, kifejezésre van szükség, és amikor végére jutunk a játékoknak, tehát a könyvnek, kiderül, hogy egész jól tudjuk használni azt a bizonyos idegen nyelvet. Képesek vagyunk bonyolult kérdéseket megérteni, rájuk az idegen nyelv szabályainak megfelelő választ adni, pedig a nyelv alapjairól alig esett szó.

Ezt az utat választották a szerzők a speciális relativitáselmélet elmagyarázásához. Azt, hogy nem mennek végig a szokásos történeti vagy didaktikai fejezeteken, hanem különböző játékokba vonják be az olvasót. A nappali és éjszakai földmérők adatainak összehasonlításából a koordináta-transzformációk tulajdonságai következnek – elegendő hozzájuk némi középiskolás matematika. *Einstein* posztulátumainak ismertetése után az események geometriája épp olyan egyszerűnek bizonyul, mint amilyen a térbeli tájékozódás egy térkép alapján. A sebességparaméter fogalmának bevezetésével teljes az analógia az egyszerű geometriai és a relativisztikus összefüggések között, mindössze a trigonometrikus függvényeket kell a megfelelő hiperbolikus függvényekkel helyettesíteni. Ma napság, amikor minden valamirevaló kalkulátor szolgáltatja a megfelelő függvényértékeket, kevesen fognak visszariadni a szerzők által javasolt néhány algebrai művelet követésétől. Cserébe a speciális relativitáselmélet leghíresebb példáit és paradoxonait kvantitatív módon lehet kezelni, a megértést számításokkal ellenőrizni.

További érdeme a könyvnek a relativisztikus dinamika egyszerű megalapozása a négyesvektorok segítségével. Az impulzus, tömeg és energia kapcsolatának mélyreható

elemzése világossá teszi a relativitáselmélet jelképévé lett $E = mc^2$ képlet valódi jelentését. Elmagyarázza például, hogy relativisztikus gáz nyugalmi tömege nem egyenlő a gázt alkotó részecskék nyugalmi tömegének összegével.

Végül még arra is telik a kérdezve kifejtő módszer segítségével, hogy a téridő görbülete és a gravitáció kapcsolatát elemezze, anélkül, hogy az általános relativitáselmélet közönséges halandó számára fel nem fogható mélységeire hivatkozná. Tudatosan vagy nem, ám dramaturgiai-lag indokoltan a történet végén újra megjelenik a két földmérő, akik most mint egyszerű utazók mérik ki a megtett távolságok összehasonlításával a Föld görbületét, jelezve, hogy az általános relativitáselmélet is elmondható mérhetően és érthetően, csak kell rá szólni egy kis időt.

A könyv először 1963-ban jelent meg, magyarul 1974-ben, 5000 példányban. Ez a mennyiség két-három év alatt elfogyott, tehát a könyv harminc éve magyarul alig hozzáférhető. Ez az oka az oktatáson belüli háttérbe szorulásának. Azokon az egyetemi kurzusokon, ahol lehetőség van a speciális relativitáselmélet alapjainak ismertetésére, a *Taylor* és *Wheeler* könyvének magyar fordítása a nehezen hozzáférhető ajánlott könyvek között szerepel. Ezt a nehézséget csak kis létszámú kurzusoknál sikerül legyőzni, ahol az elérhető néhány példány körbeadható. Nincs hasonló könyv, ami a tanulságos példák, paradoxonok végigkövetésében pótolhatná.

Az egyetemi tankönyvek és jegyzetek elképesztő mennyiségét az ambiciózus oktatók nagy száma és a szüntelen oktatási reformok együtt okozzák. Átlagos felhasználási élettartamuk öt és tíz év között lehet. Van néhány nagy kivétel, mint *Landau* tíz kötetes *Elméleti fizikája* vagy a

Born–Wolf-féle Optika. Ezek azonban szakemberek jól körülhatárolható köréhez szólnak, míg a Taylor–Wheeler minden olyan egyetemistához, akinek természettudományos programja a speciális relativitáselméletnek nem csupán néhány címszavát, hanem megértését is tartalmazza. Az új és még újabb, többnyire angol nyelvű kiadások magaslatos recenziói gyakorlott egyetemi oktatóktól származnak, és manapság bárki olvashatja ezeket a világhálón.

A jelenleg 95 éves J.A. Wheeler életművében ez a könyv csak egy epizód. Harminc éves sem volt, amikor *Bohr*-ral közösen írt tanulmányukban kimutatták, hogy a lassú neutronok hasítják az U^{235} magját. Ezek után nem csoda, hogy lényeges szerepe volt az atombombához vezető Manhattan-programban. Alapvető felismerésekre jutott a kvantummechanikában (az S -mátrix formalizmus-

hoz kapcsolható tevékenységéhez), és az általános relativitáselméletben a modern kozmológia számára ő alkotta meg a fekete lyuk fogalmát.

A speciális relativitáselmélet magabiztos használatára tanító könyv meghatározó epizódnak bizonyult, hiszen a Wheeler életművében alapvető szerepet játszó általános relativitáselmélet felé a kikerülhetetlen első lépcsőfokot jelenti. A hosszú élet lehetőséget adott a folytatásra ugyanazzal a szerzőtárssal, és 2000-ben megjelent Taylor és Wheeler könyve *A fekete lyukak felfedezéséről. Bevezetés az általános relativitáselméletbe* (Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity). Jó lenne a közeljövőben beszámolót olvasni e könyv magyar kiadásáról is!

Füstöss László
BME, Fizikai Intézet

PÁLYÁZATOK

NOBELTE PÁLYÁZAT

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézet és a Pázmány–Eötvös Természettudományi és Információs Alapítvány felhívást és ösztöndíj pályázatot hirdet

A JÖVŐ NOBEL-DÍJAS FIZIKUSA

címmel. Az ösztöndíj értéke a 2007–2008-as tanév során összesen *1 millió forint*, melyet a legjobb pályamunkát benyújtó, az ELTE Fizika BSc szakára jelentkező középiskolás hallgató számára ítél oda.¹

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete a magyar fizikusnevelés legfontosabb műhelye, az elmúlt évszázad során számos kiválóságot adott hazánk és a világ tudományának. Éppen száz esztendeje kezdte meg *Eötvös Loránd* a Fizikai Intézetben híres ingaméréseit, melyekre alapozva 1915-ben – a később Nobel-díjjal kitüntetett – *Albert Einstein* megalkotta az általános relativitás elméletét.

Az ELTE TTK az egyetemi rangsorok alapján² ma Magyarország legtehetségesebb hallgatóit képezi a természettudományos, műszaki és informatikai képzést folytató egyetemi karok közül. A Fizikai Intézet végzős fizikus hallgatóinak vannak a legszélesebb lehetőségei doktori témájuk kiválasztására, vagy kutatóként való elhelyezkedésre a hazai és külföldi multinacionális vállalatok és

bankok hazai kutatási egységeinél.³ A hallgatókat az ország legkiválóbb fizikaprofesszorai oktatják, akik közül eddig tízen szerepeltek a *Mindentudás Egyetemének* programjában.⁴

Az utóbbi évtizedek gazdasági-társadalmi változásai megnehezítették, hogy a legtehetségesebb fiatalok a kutatói pályát válasszák, és a tudomány nagy és fontos kérdéseivel foglalkozzanak. Az Európai Unióhoz való csatlakozással hazánk visszaintegrálódott a fejlett országok közösségébe, ami a következő évtizedekben megteremti a most felnövekvő nemzedék számára annak lehetőségét, hogy hazánkban is világszínvonalú kutatómunkát végezzen, és tehetsége révén elnyerje akár a világ legnagyobb tudományos elismerését, a Nobel-díjat is.

Méltán várható el, hogy a hallgatók és tudósok e kiválósági centruma maga is előremutató célokat tűzzön ki ebben a folyamatban. Ezért indítjuk *A jövő Nobel-díjas fizikusa programot*, melynek célja az ország tehetséges középiskolai hallgatóinak ösztönzése a kutatói pálya választására.

A beérkező pályaműveket az ELTE TTK Fizikai Intézet professzoraiból álló bizottság olvassa és bírálja el. Az ösztöndíjfelhívás és a részletes feltételek az Intézet honlapján (fizika.elte.hu) találhatók.

¹ A pontos és részletes feltételeket a <http://fizika.elte.hu> oldalon található ösztöndíjfelhívás tartalmazza.

² A *Heti Világgazdaság* és a felvi.hu nemrég megjelent rangsora alapján.

³ Lásd összefoglalónkat a <http://fizika.elte.hu> weboldalon.

⁴ <http://fizika.elte.hu/physics/mindentudas.html>

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: Németh Judit főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk 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 egyszámán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 700.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257

KEDVENC NAPRENDSZEREM

– pályázat tanulók részére

A dorogi Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Szakközépiskola, valamint a Magyar Csillagászati Egyesület pályázatot hirdet általános és középiskolai tanulók részére. A pályázaton határon túli magyar iskolások is részt vehetnek.

Néhány éve még csak találgattuk, hogy léteznek-e bolygók más csillagok körül. Mára – a csillagászati műszerek és az adatfeldolgozás fejlődésének köszönhetően – közel kétszáz naprendszerrel van tudomásunk. Sőt, ma már az amatőr csillagászok eszközeivel is lehetőség nyílik távoli csillagok bolygóinak észlelésére. Ezek a megfigyelések viszont csupán a legnagyobb planéták létét tudják kimutatni, kinézetükről semmit sem tudunk. A kisebb bolygók továbbra is láthatatlanok maradnak számunkra. A távoli naprendszerek összetétele tehát talány marad, e tekintetben pusztán a fantáziánkra hagyatkozhatunk.

Itt kezdődik a feladat: a pályázók válasszanak ki egy csillagot, és mutassák be, milyennek képzelik a körülötte keringő bolygórendszert! Mekkora az egyes bolygók, és hol keringenek? Milyen a felszínük (ha van nekik olyan),

milyen az ottani időjárás? Egyének vagy legfeljebb 3 tagú csapatok jelentkezését várjuk. A pályamű rajzokat (festmény, metszet, számítógépes grafika stb.) és szöveges ismertetést is tartalmazzon! A pályaműveket legfeljebb A0 méretű (1189×841 mm) kartonlapra ragasztva, vagy elektronikusan PDF vagy RTF formátumban kérjük beküldeni 2007. február 23-ig a dorogi Zsigmondy Vilmos Gimnázium és Informatikai Szakközépiskola címére.

A díjazottak jutalma nyári csillagászati táborozás, tanulmányi kirándulás, csillagászati eszközök, könyvek. A legjobb munkákból 2007 tavaszán kiállítás rendezünk a Budapesti Planetáriumban.

Támogatóink: *National Geographic magazin*, *TIT Budapesti Planetárium*, *Hegyháti Csillagvizsgáló Alapítvány*, *Astrotech Kft.*

Részletek az alábbi címen olvashatók: http://www.mcse.hu/egyesuleti_hirek/20061106_palyazat_2.html

További információk: *Nyerges Gyula*, tel.: (30) 382-9463, e-mail: jsa@mcse.hu

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Díjak, kitüntetések

A Magyar Tudományos Akadémia elnökének előterjesztésére október 23-a, az 1956-os forradalom és szabadságharc 50. évfordulója alkalmából a Magyar Köztársaság elnöke kitüntetésekkel adományozott.

BELEZNAY FERENC a *Magyar Köztársasági Érdemrend Tisztikeresztje* kitüntetésben részesült. Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet igazgatóhelyettese több évtizedes, nemzetközileg kiemelkedő kutatási, oktatási tevékenysége, az alap kutatási eredmények innovatív gyakorlati alkalmazása és a félvezető kutatás társadalmi rangjának előmozdítása elismerésékként vehette át a díjat.

SZÖRÉNYI TAMÁS a *Magyar Köztársasági Ezüst Érdemkereszt* kitüntetést kapta. Az MTA Lézerfizikai Tanszéki Kutatócsoport tudományos főmunkatársa a lézer–anyag kölcsönhatásokkal kapcsolatos kutatás hazai megteremtésében és oktatásában végzett több évtizedes, rendkívül magas színvonalú tevékenysége, nemzetközileg elismert kutatási eredményei, a PhD képzés és diákkörös hallgatók irányításában végzett kiemelkedő munkája elismerésékként, 60. születésnapja alkalmából részesült a díjban.

Wigner Jenő-díj

A Paksi Atomerőmű Részvénytársaság és a Wigner Jenő-díj kuratóriuma a *Wigner Jenő-díjat* VERES ÁRPÁD-nak, a fizikai tudomány doktorának, az MTA Izotópkutató Intézete nyugdíjas tudományos tanácsadójának adományozta a hazai nukleáris kutatás és technika bevezetése, terjesztése és biztonsága terén végzett munkásságáért és a magfotoeffektus kutatásában elért kiemelkedő tudományos eredményeiért. A díjat *Horváth Zalán* akadémikus, a Wigner Jenő-díj kuratóriumának elnöke és Molnár Károly, a műszaki tudomány doktora, a Paksi Atomerőmű Zrt. igazgatóságának elnöke adta át.

Simonyi Károly-díj

A Simonyi Károly-díj szakkuratóriuma *Simonyi Károly fizikai díjat* adományozott FARKAS GYŐZŐ-nek, az MTA doktorának, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézete tudományos tanácsadójának a lézerfény és anyag kölcsönhatása terén elért úttörő jelentőségű eredményeiért, az extrém rövid lézerimpulzusok létrehozásá-

ban játszott döntő szerepéért és új lézeres kísérleti módszerek kidolgozásáért.

A szakkuratórium *Simonyi Károly mérnöki díjat* adományozott STÉPÁN GÁBOR-nak, az MTA levelező tagjának, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem tanszékvezető egyetemi tanárának a nemlineáris dinamika területén elért, a gépészmérnöki gyakorlatban alkalmazott és kiemelkedő nemzetközi visszhangot kiváltó eredményeiért.

A díjakat *Keszthelyi Lajos* akadémikus, a Simonyi Károly-díj szakkuratóriumának elnöke adta át.

Pedagógus kutatói pályadíj 2006

A Magyar Tudományos Akadémia főtitkára középiskolai pedagógusi munkája mellett elért érdemes tudományos eredményeiért *Pedagógus Kutatói Pályadíj*ban részesítette természettudományok területén:

JAROSIEVITZ BEÁTA-t, az Ady Endre Fővárosi Gyakorló Kollégium számítástechnika szakos tanárát *Az informatika, multimédia lehetőségei az oktatásban* című pályamunkájáért;

LUDÁNYI LAJOS-t, a Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium és Szakiskola kémia-fizika szakos tanárát *Az atomfogalom taníthatóságának vizsgálata a fenomenografológia és a tudástér elmélet segítségével* című pályamunkájáért;

VARGA ISTVÁN-t, a Békéscsabai Szent-Györgyi Albert Gimnázium Szakközépiskola és Kollégium matematika-fizika szakos tanárát *Folyadékok a környezetben* című pályamunkájáért;

ZSÚDEL LÁSZLÓ-t, a Miskolci Földes Ferenc Gimnázium matematika-fizika szakos tanárát *Biofizika* című tanönyvéért.

A díjakat *Meskó Attila*, az MTA főtitkára adta át 2006. december 13-án az MTA Tudósklubjában.

Gratulálunk a kitüntetetteknek!

HÍREK ITTHONRÓL

Budapesti Szkeptikus Konferencia 2007

Babonák, misztikus tanok minden időben voltak, de a tudomány eredményeit félremagyarázó, azokat alantas célokra felhasználó áltudomány a 20. század gyermeke, amely a média segítségével vált nagyhatású közellenségé. Ellene a küzdelmet az oktatásnak – köz- és felsőoktatásnak – és a tudománynépszerűsítésnek kell vállalnia.

A gyerek az iskolában megtanulja a tudnivalókat, mire érett lesz tud mindent, amire szüksége lehet az életben. Aki tovább tanul, az a felsőoktatásban már kifejezetten tudományos ismeretekhez juthat. Kérdés ezek után az, hogy hogyan élnek meg a kurzuslók, sarlatánok, szemfényvesztők. Pedig nagyon jól megélik, holott ők is csak olyan iskolákba jártak, mint mi, akiket rendszeresen rászednek. Hogy lehet ez?

– A tudomány olyan bonyolult, hogy képtelenség legalább a nélkülözhetetlen lényegét továbbadni?

– A köz- és felsőoktatás nem képes ellátni feladatát?

– A média folyamatos agymosása a tudományos gondolkodás igényét is kiöli belőlünk?

– Az irracionális elem mindig is uralkodó volt ismereteinkben, csak ezt eddig bölcsen magától értetődőnek tekintettük?

Tudomány és áltudomány kikerülhetetlen kérdéseit ezúttal az oktatás folyamatában vizsgáljuk. Az iskola és egyetem mellett a tudomány és a média, sőt, a művészetek szerepét is elemezni próbáljuk a világról szerzett tudásunk kialakításában. Fontos kérdés, hogy van-e sörögetni valónk a saját portánk előtt is? Egyetemek, oktatási intézmények falai között találkozhatunk-e áltudományokkal?

A fentiek jegyében született meg három éve a BME Fizikai Intézetének falai között a Budapesti Szkeptikus Konferencia, elsősorban az egyetemi hallgatóságot te-

kintve célközönségnek, de szívesen látunk minden érdeklődőt. A műegyetemi skeptikus találkozók sorában a 2007-es lesz a negyedik. Konferenciánkat hagyományosan minden évben február utolsó szombatján rendezzük meg, ezúttal 2007. február 24-én a BME Fizikai Intézet F29-es tantermében.

HELYREIGAZÍTÁS

Folyóiratunk idei 11. számában, *Földes István: Részecskegyorsítás lézerplazmában* című írásában, a 367. oldalon a nyomtatásból sajnálatosan eltűnt két képlet. Az értelemzavaró hibáért elnézést kér a szerzőtől és az olvasóktól a műszaki szerkesztő. A szóban forgó rész helyesen a következő:

Az intenzitásnak elég nagyoknak kell lennie ahhoz, hogy létrejöhessen a plazmahullám hullámtörése már az első oszcilláció után. Az ehhez szükséges térerősséget az

$$\frac{E_{wb}}{E_0} = \sqrt{2(\gamma_p - 1)}$$

kifejezés adja meg, ahol

$$\gamma_p = \sqrt{1 - \frac{v_g^2}{c^2}} = \frac{\omega_0}{\omega_p}$$

Ebben az esetben a plazmahullám frontja görbült, először a tengely mentén törik, mégpedig korábban, mint a síkhullám.

A FIZIKAI SZEMLE LVI. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

60 év a fizika bővületében – 75 éves lenne Zimányi József (<i>Lévai Péter</i>)	416
A Mössbauer-effektust felhasználó kutatások Magyarországon (<i>Faiyel Gyula</i>)	253
<i>Ádám Péter, Janszky József</i> : Koherens állapotok a kvantumoptikában	325
<i>Andrási Andor</i> : Belső sugárterhelés meghatározása egésztestszámítással	299
<i>Aszódi Attila</i> : Csernobil 20 éve	114
<i>Bárdossy György</i> : Amit a cunamiról és okairól ma tudunk	46
<i>Barna Dániel</i> : Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben	151
<i>Bebesi Zsófia</i> : A Cassini–Huygens űrmisszió legújabb eredményei a Szaturnusznál	74
<i>Beke Dezső, Erdélyi Zoltán, Langer Gábor</i> : Keveredés nosokálán	258
Beközöntő	1
Beszélgetés a 75 éves Lovas Istvánnal (<i>Sailer Kornél</i>)	343
<i>Biró Gábor</i> : Gábor Dénes és M. Zemplén Jolán 1961-es levélváltása	94
<i>Biró István</i> : Mágneses ingák kísérleti tanulmányozása	13
<i>Biró Tamás Sándor</i> : Elosztott tömegek a kvarkanyagban	334
<i>Bujtás Tibor, Nényei Árpád</i> : Az üzemszavár helyreállításának sugárvédelmi kérdései	119
<i>Csizmadia Szilárd</i> : A Plútó osztályozásáról	399
<i>Dombi Péter</i> : Optikai frekvenciametrológia, avagy mire jók a frekvenciafésűk?	91
<i>Éber Nándor</i> : Polyadékkristály-televíziók – a 21. század képernyői	123
<i>Farkas Győző</i> : Attoszekundum időtartamú fényimpulzusok	408
<i>Fodor Zoltán, Katz Sándor</i> : Volt-e (van-e) fázisátmenet a Big Bang (Little Bang) során?	393
<i>Fodor Zoltán</i> : Az erős kölcsönhatás fázisdiagramja	42
<i>Földes István</i> : Részecskegyorsítás lézerplazmában	365
<i>Füstöss László</i> : Arcképvázlat Gombás Pálról	127
<i>Gergely György</i> : 25 éves a rugalmas elektronszórás-spektrometria	369
<i>Gruiz Márton, Radnai Gyula, Tél Tamás</i> : A rugalmas fonálú ingáról – mai szemmel	337
<i>Hargittai Magdolna</i> : Beszélgetés Telegdi Bálinttal	229
Hommage à Ferenczi György (<i>Hermann G. Grimmeiss</i>)	349
<i>Horváth Dezső</i> : 16 évem a CERN-ben	155
<i>Horváth Gábor, Subai Bence, Bernáth Balázs, Gerics Balázs, Csorba Gábor, Gasparik Mihály, Évinger Sándor, Pap Ildikó</i> : Milyen a teherbíró, de könnyű csöves csont szerkezet?	82
<i>Iglói Ferenc</i> : Száz éve halt meg Ludwig Eduard Boltzmann, a statisztikus fizika megalapozója	305
<i>Keszthelyi Lajos</i> : Emlékezés a Mössbauer-effektus hazai alkalmazásának első éveire	254
<i>Király Péter</i> : A Voyager-1 űrszonda kilépett a szuperszonikus napszélbuborékból	87
<i>Kiss Csaba</i> : A kozmikus infravörös háttér megfigyelése	145
<i>Koós Antal Adolf</i> : Szén nanocsöveken alapuló szelektív gázérzékelők	226
<i>Kovács Ferenc, Nádás György, Regöly Mérei János, Szebeni Ágnes</i> : Az ultrahang terápiás alkalmazásai	256
<i>Kroó Norbert</i> : Az alap kutatások jövője, különös tekintettel Európára	37
<i>Lovas István</i> : Milyen lenne a világ, ha a Planck-állandó zérus volna, a fénysebesség pedig végtelen?	73
<i>Márk Géza István</i> : Egy hullámcsomag kalandjai az alagútmikroszkópban	190
<i>Mezei Pál, Cserfalvi Tamás</i> : Gázkiszülés analízis a környezetvédelemben	217
<i>Molnár Mihály</i> : A szén és az idő: radiokarbon kormeghatározás	181
Most lenne 60 éves – megemlékezés Ferenczi Györgyről (<i>Mojzes Imre</i>)	348
Nagy Károly 80 éves! (<i>Csikor Ferenc</i>)	416
<i>Nemcsics Ákos</i> : Vékonyrétegekről, nanostruktúrákról a napelem üregyén	293
<i>Németh Judit, Szabados László</i> : A sötét anyag	362
<i>Németh Judit</i> : Hans A. Bethe, a magfizika és a nukleáris asztrofizika egyik szülőatyja	234
<i>Ormai Péter</i> : Radioaktív hulladékok elhelyezése	329
<i>Pietschmann, Herbert</i> : A neutrínó – múlt, jelen, jövő	2
<i>Pozsgai Imre</i> : Mikroszkópia és lokális analízis	185
<i>Pozsgai Imre</i> : Szupravezető röntgendetektorok	109
<i>Pusztai Tamás, Bortel Gábor, Tóth Gyula, Gránásy László</i> : Komplex kristálymorfológiák modellezése három dimenzióban	412
Részecskefizika, ami a Nature szerkesztőit is felvillanyozta! (<i>Patkós András</i>)	397
<i>Ribár Béla</i> , 1930–2006 (<i>Berényi Dénes</i>)	132
<i>Süle Péter</i> : Nanoméretű, ionbombázás-indukált változások vizsgálata atomisztikus szimulációkkal	7
<i>Szabó M. Gyula</i> : Nagy égboltfelmérések a csillagászatban	403
Száz éve született Detre László (<i>Szabados László</i>)	131
Szerzőink figyelmébe	108
<i>Sziki Gusztáv Áron</i> : Inkruszált régészeti kerámiák vizsgálata mikro-ionnyalábos módszerekkel	10

<i>Tél Tamás</i> : A Coriolis-erő és a modern környezetfizika: a lefolyótól a ciklonokig	263
<i>Toró Tibor</i> : Ettore Majorana (1906–1938)	267
<i>Trócsányi Zoltán</i> : A 2006. évi fizikai Nobel-díj	357
<i>Ungár Tamás</i> : Diszlokációk segítik a földkéreg mozgását	289
<i>Vajda György</i> : Energiaellátás a 21. században	56
<i>Verő József</i> : Geomágneses pulzációk: hullámok a bolygóközi térből és a magnetoszférából	78
<i>Vincze Imre</i> : Harmincöt év mágneses hordaléka	50
<i>Vinkó József</i> : Távolságmérés szupernóvákkal: tények és talányok	221

A FIZIKA TANÍTÁSA

A 2006/2007. tanévi Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése	384
<i>Ambrózy Béla, Mester András, Petróczy Gábor</i> : Fizikaversenyek Borsod-Abaúj-Zemplén megyében	22
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Ügyrendje	2006/9
Beszámoló a XVI. Öveges József Fizikaversenyéről (<i>Csákány Antalné, Jubász Nándor, Ósz György, Vida József</i>)	271
Csodatorony Szegeden (<i>Nánai László</i>)	352
Fórumok az új rendszerű fizika-érettségi tapasztalatairól	139
<i>Görbe László, Nyerges Gyula, Sebestyén Zoltán, Simon Péter, Ujvári Sándor</i> : Fizikai mérések ütközben	420
<i>Gyarmati Csaba</i> : Gyorsan bemutatható Foucault-inga kísérlet	350
<i>Hraszkó Péter</i> : A relativitáselmélet tanításáról	61
<i>Iffy Zoltányi Sándor</i> : Fizikás honlapjaim	98
<i>Jubász András</i> : Egyszerű kísérletek mágnesekkel	371
<i>Kiss Miklós</i> : Készítsünk napórát!	132
<i>Kovács Mihály</i> , a piarista tanár, 1916–2006 (<i>Görbe László</i>)	200
<i>Lang Ágota</i> : Science On Stage, avagy mentsük meg a természettudományok tanítását!	161
<i>Légrádi Imre</i> : A Doppler-képletek egyszerű levezetése	268
<i>Molnár Miklós, Farkas Zsuzsa</i> : Optikai mérések compact disc-kel	197
<i>Nagy Péter</i> : Kvantitatív problémamegoldás Minkowski-diagramon	19
<i>Nyerges Gyula</i> : Eratoszenész-mérés	96
<i>Nyerges Gyula</i> : Globe at Night – Mi is részt vettünk a felmérésben	240
<i>Radnóti Katalin</i> : A kopernikuszi fordulat	236
<i>Radnóti Katalin</i> : Első éves BSc hallgatók fizikatudása	424
<i>Raics Katalin</i> : A radioaktivitás megismerésének egy jó lehetősége	242
<i>Sebestyén Klára, Simon Péter, Vibartné Balogh Éva</i> : Fizikatanárnak lenni jó	313
<i>Simon Péter</i> : Három, tömegközépponttal kapcsolatos probléma	195
<i>Sükösd Csaba</i> : IX. Országos Szilárd Leó Tanulmányi Verseny	275
<i>Szatmári-Bajkó Ildikó</i> : „Káoszt”? – azt!	376
<i>Ujvári Sándor</i> : Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny feladatairól	380
<i>Vankó Péter</i> : Fizika az erdei iskolában	165
<i>Vankó Péter</i> : Izgalmas mérések a mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumban	307
<i>Vida József</i> : Természettudományos varázstorony Egerben	202

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

A 2005. évi fizikai Nobel-díj (<i>Csörgő Tamás</i>)	72
A cunami (<i>Jánosi Imre</i>)	36
A napenergia modern felhasználási lehetőségei (<i>Horváth Ákos</i>)	144
A sarkított fénytől a Polaroid szemüvegig (<i>Härtlein Károly</i>)	108
Digitális adattárolás I. – Forgó lemezek (<i>Mihály György</i>)	180
eScience (<i>Csabay István, Papp Gábor</i>)	288
Fizikus szemmel a szivárványról (<i>Cserti József</i>)	320
Kozmikus infrahang-diagnosztika (<i>Kolláth Zoltán</i>)	392
Kvantuminformáció (<i>Geszti Tamás</i>)	216
Membrán nanocsövek (<i>Derényi Imre</i>)	432
Rendezetlenségbe fagyva – az üvegállapot sajátosságai (<i>Temesvári Tamás</i>)	252
Szuperötövezet egykristályok – árágakövek a gázturbinákban (<i>Lendvai János</i>)	356

INTÉZETEINK TANSZÉKEINK

Alap- és alkalmazott kutatások az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia Elektronfizikai Kutatóintézetében (<i>Spenik Ottó</i>)	28
--	----

BÚCSÚZUNK

Hevessy József, 1931–2005 (<i>Damjanovich Sándor</i>)	31
Nágel Ferenc, 1931–2005 (<i>Holló Sándor, Ugrósy László</i>)	64

DOKUMENTUM

A BME közleménye	243
Bush, George W.: State of the Union Address	142

HÍREK – ESEMÉNYEK

2005. évi Fizikai Nobel-díj	33
2007-ben kezd működni a Nagy Hadron Ütköztető	251
A 2006. évi Ericsson-díjasok	391
A Jaguár sebessége túlszárnyalta az 50 teraflopot	319
A Magyar Nukleáris Társaság Közgyűlése	35
A Magyar Tudomány Ünnepe	246
A Max Planck Társaság delegációjának látogatása az MTA-n	247
A társulati közgyűlés meghirdetése	143
„A tudomány (ismét) színe lép(ett)” (Theisz György, Ujvári Sándor)	390
A Vákuumfizikai Szakcsoport szemináriumi 2006 I. félévében	35
A világ legjobb rádiótváscsöveit a bezárás fenyegeti	388
Akadémiai élet	36
Akadémiai kitüntetések – Fazekas Patrik, Derényi Imre, Fülöp Zsolt, Petrovay Kristóf, Farkas Illés, Palla Gergely, Pusztai Tamás, Smausz Kolumbán Tamás	143
Alvin M. Weinberg, 1915–2006	387
Antiprotonok a daganatos betegségek sugárterápiájában	387
Arany „buckyball” fedeztek fel	287
Átdadták az idei Rátz Tanár Úr Élelműdíjakat	390
Az alapkutatótól az innovációig	354
Az atomoktól a csillagokig	67, 288
Az ELFT Vákuumfizikai, -technológiai és Alkalmazásai Szakcsoportjának szemináriumi 2006. II. félévében	247
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Közhasznúsági jelentése a 2005. évről	210
Az Eötvös Társulat 2006. évi Küldötközgyűlése	209
Az EXO Projekt	320
Beszámoló a Fizika Évéről (Härtlein Károly, Ujvári Sándor)	101
Bodó Zalán emlékülés (Gergely György)	65
Bolyai Nap 2006	247
Budapesti Szkeptikus Konferencia 2007	430
Detre László-emlékülés az Akadémián (Sz. L.)	179
Díjak, kitüntetések – Beleznay Ferenc, Szörényi Tamás	429
Egy fiatal változócsillag kitérésének váratlan vége	68
Egyszerűbb leképezés egyetlen pixelel kamerával	389
Einstein „legnagyobb tévedése” a legújabb szupernóva-kutatások fényében	69
Elhunyt Zimányi József akadémikus	318
Elkezdődött az Energia Suli	318
Előadások az Öveges József Gyakorló Középiskolában	391
Előadás-sorozat az óbudai Polaris Csillagvizsgálóban	68
Eötvösnek nincs szerencséje (Kovács László)	391
Eötvös-verseny – 2006	284
Észak-Korea atomkísérletet hajtott végre?	356
Európában elsőként...	284
Ezüstizotóp egzotikus radioaktivitása	249
Felhívás jelölésre: Mikola Sándor Díj	392
„Finomítják” a finomstruktúra-állandót	286
Fizikatörténeti labirintus középiskolásoknak	35
Fizikusok a technológiai innováció élvonalában	36
Hargittai István: Az öt világformáló marslakó – könyvbemutató	180
Három bolygóból álló Naprendszeren kívüli bolygórendszer	286
Hurrikán a Szaturnuszon?	388
IAMP106 konferencia	355
Ismeretterjesztő filmek a fizikáról	105
Japán csatlakozik a röntgenlézer-építési versenyhez	389
Japán holdbázist épít?	286
Kitüntetés – Molnár József	36
Kitüntetések – Berényi Dénes, Turiné Frank Zsuzsa	67
Kutatás-alkalmazás 2006 rendezvény	355
Kutatók éjszakája	319
Marx György: Gyorsuló idő – könyvbemutató	36
Meghívó szemináriumra	355
Megújult csillagász honlap	180
Mérések és a gravitáció Einstein-féle elmélete	105
Mesterséges gömbvillám?	251
„Molekuláris mozi” a fényről	287
MTA–CEA együttműködési megállapodás	246
Nagyenergiájú gammasugarak a Tejútrendszerből	251
Nanofizika és nanotechnológia őszi iskola	247
Nanométerű elem az emberi szemben	106
Nanoskálán másképpen fénylik az arany	69
Negyedik alkalommal osztották ki a Talentum Akadémiai Díjat	104
Nem növekszik tovább az ózonlyuk	389
Nemzetközi Gábor Dénes-díj 2006 fiatal kutatók számára	67
Nívódíj 2005 – Horváth Árpád	95
Nyolc bolygó van a Naprendszerben!	285
Örökségvédelmi napok	318
Ötven éves a dubnai Egyesített Atomkutató Intézet	106
PAMELA útnak indult a világűrbe	250
Pedagógus kutatói pályadíj 2006	430

Plútó gyermekei: egy istennő és egy szörnyeteg	252
Pulzások rengéseinek előrejelzése	251
Regionális diákköri konferencia	319
Részecskefizikai diákműhely	68
Rónaszéki László, 1931–2006 (Gyimesi Éva)	179
Simonyi Károly Tudományos Emlékülés, 2006	283
Simonyi Károly-díj	429
Spennik Ottó az Ukrán Nemzeti Tudományos Akadémia rendes tagja	213
Statistikus Fizikai Nap	105
Számítógépes módszerek a modern fizikában	285
Székfoglaló előadások	67
Szépfalusy Péter 75 éves (Tél Tamás, Sasvári László)	214
Támadás alatt a tudomány	250
Társulati események és tervek a 2005/06-os akadémiai évben	33
Tényleg létezik a sötét anyag	388
Tudomány és média – németországi magyar kutatók második találkozója	356
Tudományos ismeretterjesztő film a gravitációról	68
Túlzó hírek a kínai fúziós kísérletekről	389
Új akadémiai doktorok	67
Új és biztonságosabb reaktor-fűtőanyagok	250
Új módszer galliumnitrid-kristályok növesztésére	249
Új röntgen besugárzási módszer segítheti a sugárterápiát	250
Új spallációs neutronforrás az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban	69
Új szuperszámítógép a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban	69
Ünnepi tudományos ülés a 70 éves Zawadowski Alfréd tiszteletére	143
Ünnepi ülésszak az Akadémián Zawadowski Alfréd 70. születésnapján (Újsághy Orsolya, Borda László, Zaránd Gergely)	178
Úrsziczka találkozó	287
Vákuumfizikai szeminárium 2006. május 9-én	247
Vákuumtechnikai tanfolyam	213
Változócsillagászati találkozó	68
Világrekord nagyságú mágneses térerősség	320
Wigner Jenő-díj	429

VÉLEMÉNYEK

Az energiaválság mellékterméke (Füstöss László)	243
Györi István: Érettségi és vidék, avagy „növeli, ki elföldi a bajt”	169
Tél Tamás: Az emelt szintű érettségiről	244
Tóth András: A készintű érettségi és az új felvételi rendszer egy műgyetemi oktató szemével	206

KÖNYVESPOLC

Fényes Tibor (szerk.): Atommagfizika (Kiss Ádám)	70
Frei Zsolt, Patkós András: Inflációs kozmológia (Abonyi Iván)	70
Gazda István (szerk.): Einstein és a magyarok (Füstöss László)	71
Juhász Ferenc, Patkós András, Sükösd Csaba (szerk.): Gyorsuló idő – Marx György válogatott írásai (Meskő Attila)	177
Kecskés Lajos: Egy ölnyi végtelen (Tél Tamás)	252
Litz József: Fizika II. (Abonyi Iván)	215
Nagy Márton: Vermes Miklós, a liceumi diák (Abonyi Iván)	36
Ropolyi László (szerk.): Wigner Jenő válogatott írásai (Berényi Dénes)	317
Silberer Vera, Staar Gyula (szerk.): A fizika százada (Berényi Dénes)	177
Staar Gyula: Fizikusok az aranykorból (Abonyi Iván)	385
Szatmáry Zoltán, Aszódi Attila: Csernobil (Makai Mibály)	144
Székel László (szerk.): Einstein, a megasztár (Bencze Gyula)	106
Taylor, E.F., Wheeler, J.A.: Téridőfizika (Füstöss László)	427
Zátonyi Sándor: Fizikai kísérletek környezetünk tárgyaival (Härtlein Károly)	282

NÉGYSZÖGLETES KERÉK	26, 141, 281
---------------------	--------------

PÁLYÁZATOK

A Bolyai Kollégium jelentkezési felhívása	208
A jövő század úrállomása	32
A Tejútrendszer modellje – pizzából	194
Állásajánlat – MTA RMKI	386
Álláshirdetés – MFA Vékonyréteg-fizika Osztály	246
Az Öveges József díj pályázati felhívása	176
CERN-látogatás	33
Doktori iskolák	141
Felhívás javaslattételre – társulati díjak	72
Felhívás – kísérletek középiskolában	72
Kedvenc naprendszerem	429
Miről mesélnek a csillagok?	32
NobELTE pályázat	428
Pályázat kísérleti fizikából	245
Pedagógus kutatói pályázat	208
Science on Stage pályázati felhívása	317
Tudományos kutatói állás az Izotópkutatóban	207
Tudományos kutatói állás az RMKI Biofizikai Osztályán	175

MEMBRÁN NANOCSONYOK

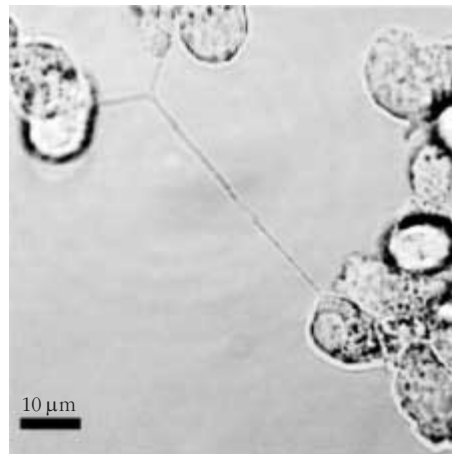
Az élő sejtek felépítésükénél fogva két alapvető csoportra oszthatók: a sejtmagot nem tartalmazókra (prokariótákra vagy más néven baktériumokra), valamint a sejttaggal rendelkezőkre (eukariótákra, ahová többek között az összes többsejtű élőlény sejtjei is tartoznak), *1. ábra*. Ezen utóbbi csoport tagjainak további jellegzetessége, hogy bennük különféle sejtstruktúrák találhatók, amelyek különböző biológiai feladatok ellátására szakosodtak. A sejtstruktúrák általában nagy mennyiségű membránt (a sejtthártyához hasonló felépítésű, néhány nanométer vastagságú lipid kettősréteget) tartalmaznak, hiszen a biokémiai feladatokat végző fehérjék jelentős része membránhoz kötődve működik. Ezek a membránstruktúrák meglehetősen nagy dinamikus alakváltozásokra képesek (a sejt életciklusa során vagy külső hatások következtében nemcsak átrendeződhetnek, de akár időnként el is tűnhetnek, majd újra felépülhetnek).

Mivel a sejtstruktúrákban található membránok összefüggésben több nagyságrenddel is meghaladhatja a sejt felületét, valamiféle kompaktifikációra szorulnak. Erre az egyik kézenfekvő lehetőség az, hogy a membránok lapos korong alakú képződmények szorosan pakolt halmazába rendeződjenek (mint pl. az energiaátalakítást végző mitokondriumok belső membránja, vagy a fehérjék szintéziséért felelős durva endoplazmatikus retikulum, vagy éppen a fehérjék osztályozását végző Golgi-apparátus). Egy másik lehetőség a kompaktifikációra a mindössze néhány száz nanométer átmérőjű, de akár több mikrométer hosszúságú nanocsonyok kialakítása. Ilyen nanocsonyok hálózatából áll a sima endoplazmatikus retikulum. Nanocsonyok találhatók a Golgi-apparátus bemeneti és kimeneti oldalán is, de még a sejtthártyán is különféle csőszerű membránkitüremkedések (csillók, állábak stb.) fordulhatnak elő. Csak az utóbbi években derült fény arra, hogy bizonyos típusú sejtek (pl. immunsejtek, agysejtek, vesesej-

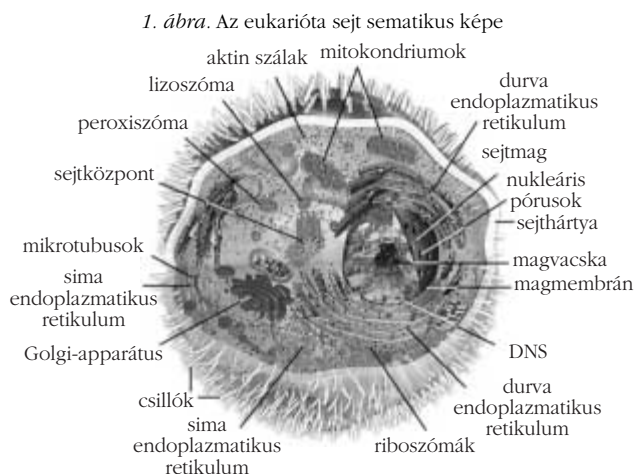
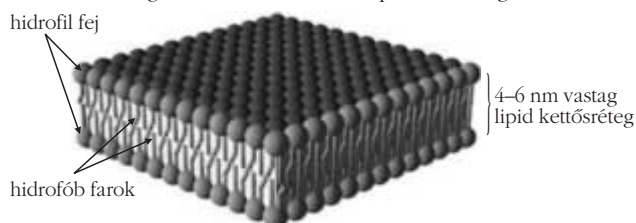
tek) képesek egymás közt nanocsonyokat létrehozni, majd ezeken keresztül kommunikálni (különböző anyagok vagy jelek továbbításával), *2. ábra*. Mivel a nanocsonyok gyorsabban létrehozhatók, távolabbra elérhetnek és könnyebben szállíthatók, mint a korong alakú struktúrák, feltehetően a dinamikusabban változó szerkezetű vagy a transzportfolyamatokban résztvevő membránstruktúrák esetén lehetnek hasznosak a sejtek számára.

A membrán nanocsonyok kialakulása nagyon egyszerűen leírható fizikai folyamat. Ezt tekintjük át részletesen a cikk hátralévő részében. Ehhez elég annyit tudnunk a membránokról, hogy jól közelíthetők kétdimenziós összenyomhatatlan (nyújthatatlan) folyadékként. Kétdimenziósként azért, mert mindössze két vékony lipidrétegből állnak (amelyben a lipidmolekulák hidrofób farokrésze a membrán belseje felé, a hidrophil fejrésze pedig kifelé mutat), *3. ábra*, és ezek együttes (tipikusan 4–6 nm) vastagsága messze elmarad a membránfelületek egyéb jellemző méretétől (pl. a másik két irányú kiterjedésétől vagy a görbületi sugarától). Összenyomhatatlannak azért tekinthetjük őket, mert minden egyes lipid molekulára egy jól meghatározott méretű felületegység jut (1–2%-nál nagyobb felületváltozást a membrán nem bír ki). Folyadékként pedig azért kezelhetjük, mert a membrán síkjában (a sejtek működését lehetővé tevő hőmér-

2. ábra. Immunsejtek között feszülő membrán nanocsonyok. Három cső a találkozásuk pontjában 120°-os szöget zár be egymással.



3. ábra. A biológiai membránokat alkotó lipid kettősrétegek szerkezete.



sékleten) a lipidmolekulák szabadon elmozdulhatnak. A viszkozitásuk egyébként körülbelül két nagyságrenddel meghaladja a vízét.

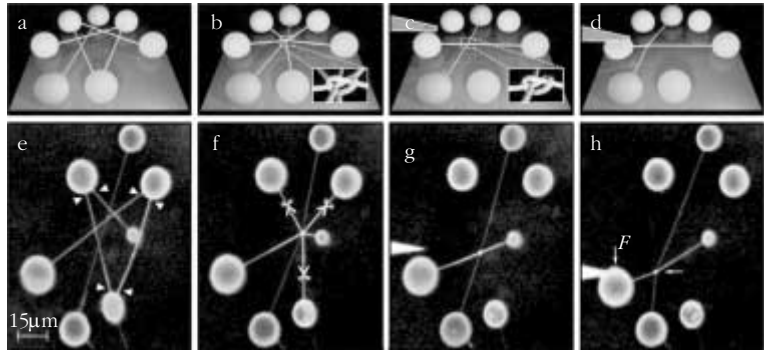
Membrán nanocsövek általában erősen lokalizált húzóerők hatására jönnek létre. Ez történhet úgy, hogy motorfehérjék (olyan molekulák, amelyek képesek a sejtvázaszálai mentén haladni) egy kis felületen megragadják a membránt, és elkezdik a membrán síkjára merőlegesen húzni, vagy pedig úgy, hogy polimerizálódó szálak elérik a membránt, és azt elkezdik nyomni. Már csak az a kérdés, hogy a lipidmembránoknak milyen fizikai tulajdonsága teszi lehetővé az ilyen hosszú cső alakú kitüremkedések kialakulását, hiszen a hétköznapi tapasztalatunk azt sugallja, hogy ha egy lapot vagy lepedőt egy pontban megragadva elkezdünk deformálni, akkor valami kúpszerű képződményt kapunk. A válasz abban rejlik, hogy a membránok deformációját alapvetően a következő két rugalmas paraméter határozza meg: a σ felületi feszültség és a κ hajlítási merevség.

Ha ugyanis egy közelítőleg sík alakú membráncsövet egy pontjában meghúzva deformálunk, akkor ehhez először is többletfelületre van szükségünk. Mivel a membrán nyújthatatlan, ezt a többletfelületet vagy a membrán (termikusan gerjesztett) gyűrődéseinek kisimítása árán szerezhetjük be, vagy a membrán egy távoli részétől vonhatjuk el (pl. letapadt felületdarabok felszakításával), vagy a membránnal esetleg kapcsolatban lévő lipidtartályból nyerhetjük ki. A lényeg, hogy ehhez energiát kell befektetnünk, amelynek felületegységre jutó nagyságát jellemzi a σ ($\approx 10^{-6}$ – 10^{-3} N/m) felületi feszültség. Bár ez a paraméter szoros analógiában áll a közismert határfelületi (pl. víz–levegő) feszültséggel, a fentiek alapján jól látható, hogy fizikai eredete egészen más.

Mivel a membrán egy kétdimenziós folyadék, az érintő síkjával párhuzamos nyírással szemben nem tanúsít rugalmas ellenállást, csak a síkra merőleges hajlítással szemben. Ez utóbbit jellemzi a κ ($\approx 10^{-20}$ – 10^{-19} J) hajlítási merevség, amely felületegységenként $(\kappa/2)C^2$ energiával bünteti a membrán C görbületű meghajlítását.

Hogy egy szemléletes képet kapjunk a nanocsövek keletkezéséről, először csak a felületi feszültségnek a felületet csökkentő hatását vegyük figyelembe. A minimális felülettel jellemzett konfigurációhoz akkor jutnánk el, amikor a membrán teljesen visszahúzódna az eredeti síkjába, és a húzási ponthoz már csak egy infinitezimálisan keskeny (zérus felületet hordozó) szállal kapcsolódna. Ahogy azonban a membrán kezd ráhúzódni erre a képzeletbeli szálra (bármilyen is legyen a kiindulási konfiguráció), a görbülete egyre csak nő. Ekkor válik meghatározó szerepűvé a hajlítási merevség, amely egy ponton megállítja az összehúzódást. Az eredmény pedig egy egyenes keresztmetszetű cső (a végeitől eltekintve), amely a membrán síkjára és a húzási pont között feszül.

Ennek a csőnek egyszerűen kiszámolhatjuk a sugarát. Annyit kell csak tennünk, hogy felírjuk egy R sugarú (vagyis $C = 1/R$ görbületű) és L hosszúságú henger rugalmas energiáját:



4. ábra. Csomó kötése membrán nanocsőre oly módon, hogy (a és e) a megfelelő három vezikulumból (membránszákból) kifutó csöveket a tövüknél fogva párosával összeolvasztjuk, majd miután az így keletkező Y-elágazások középre befutnak, (b és f) a maradék három csövet is elvágjuk (felső képsor: illusztráció, alsó képsor: kísérlet).

$$E(R, L) = \left[(\kappa/2) (1/R)^2 + \sigma \right] 2\pi R L,$$

majd minimalizáljuk R szerint. Ebből

$$R_0 = \sqrt{\kappa/(2\sigma)}$$

adódik a cső sugarára, amely tipikus paraméterértékek esetén (pl. $\sigma = 5 \cdot 10^{-5}$ N/m és $\kappa = 4 \cdot 10^{-20}$ J) valóban mindössze néhány száz nanométer nagyságú. Ha most az R_0 -ra kapott formulát visszahelyettesítjük a henger rugalmas energiájába, akkor az

$$E(R_0, L) = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa} L$$

kifejezésből kiolvashatjuk, hogy a nanocsövek hosszegységként

$$f_0 = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa}$$

energiát tárolnak, vagyis éppen ekkora húzóerő szükséges a létrehozásukhoz. Tipikus paraméterértékekre ez tíz pikonewton körüli erőt jelent, amelynek azért nagy a biológiai jelentősége, mert már akár egyetlen polimerizálódó szál vagy néhány molekuláris motorfehérje is képes kifejteni. Az, hogy a nanocsövek mentén egy ilyen állandó nagyságú feszítőerő lép fel, jól látszik három cső találkozásánál, ahol is az erők egyensúlya miatt a csövek úgy állnak be, hogy egymással páronként 120° -os szöget zárjanak be.

Végezetül érdemes megemlíteni, hogy membrán nanocsöveket és egész nanocsőhálózatokat mesterségesen (pl. optikai csipesszel vagy mikropipettával) is elő lehet állítani. Ezek segítségével tanulmányozhatjuk a membránok dinamikáját és rugalmas tulajdonságait (pl. különféle lipidek és membránfehérjék jelenlétében), amelyek nagyon fontosak a sejtekben található különféle sejtzervecské kialakulásának és átrendeződésének megértése szempontjából. Ugyanakkor a membrán nanocsövek alkalmazásak lehetnek új nanotechnológiai eljárások kidolgozására is, például nagyon kis mennyiségű folyadékok jól kontrollált módon történő mozgatására, keverésére. A nanocsövek egyébként meglepően stabil struktúrák, még azt is könnyedén kibírják, ha csomót kötünk rájuk (4. ábra).

Derényi Imre

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék