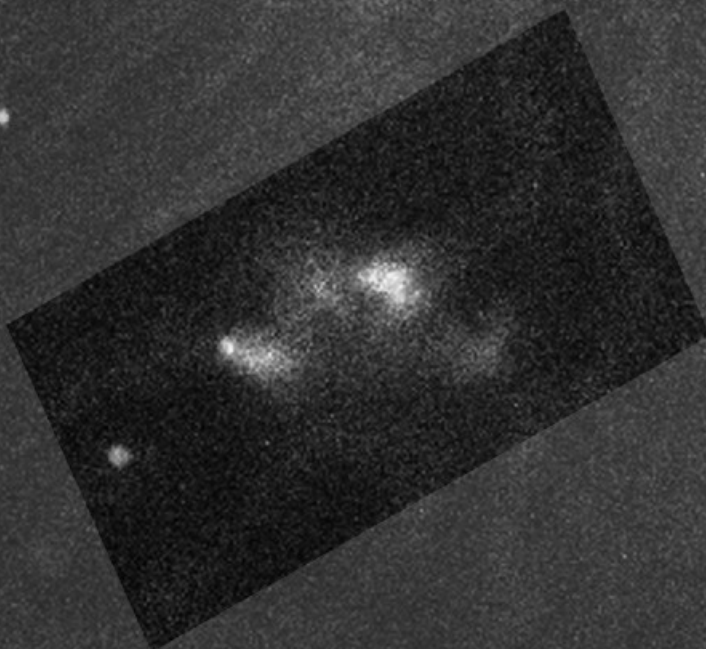
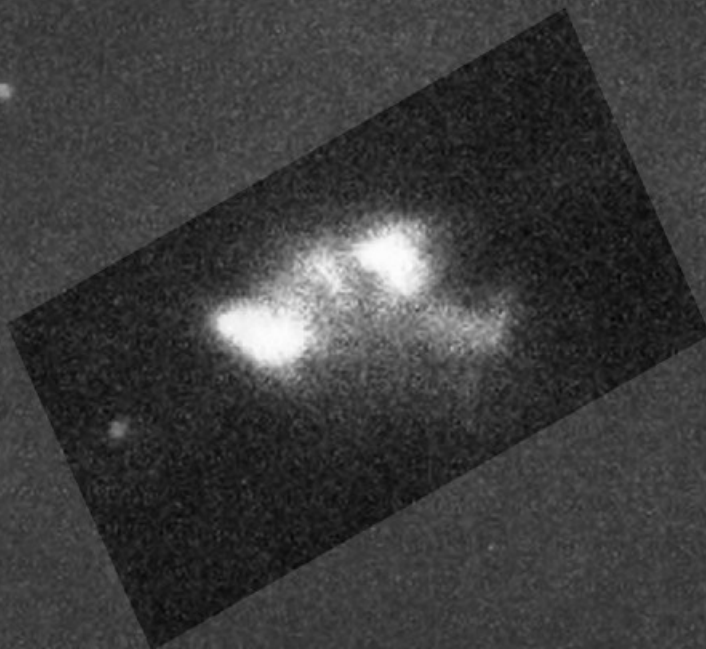


fizikai szemle



2006/2

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, Trócsányi Zoltán,
Turiné Frank Zsuzsa, Ujvári Sándor

Megbízott szerkesztő:

Szabados László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A V1647 Orionis fiatal változócsillag
és az általa megvilágított McNeil-köd
a csillag kitérésének maximuma idején
(fent) és váratlanul gyors
elhalványodásakor (lent).
A felvételek az MTA KTM Csillagászati
Kutatóintézete Pizskéstetői
Obszervatóriumában az 1 m átmérőjű
RCC-távcsővel és az arra szerelt
CCD-kamerával készültek.

TARTALOM

<i>Kroó Norbert:</i> Az alap kutatások jövője, különös tekintettel Európára	37
<i>Fodor Zoltán:</i> Az erős kölcsönhatás fázisdiagramja	42
<i>Bárdossy György:</i> Amit a cunamikről és okairól ma tudunk	46
<i>Vincze Imre:</i> Harmincöt év mágneses hordaléka	50
<i>Vajda György:</i> Energiaellátás a 21. században	56

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Hraskó Péter:</i> A relativitáselmélet tanításáról	61
---	----

BÚCSÚZUNK

Nágel Ferenc, 1931–2005 (<i>Holló Sándor, Ugródsy László</i>)	64
---	----

HÍREK – ESEMÉNYEK

65

KÖNYVESPOLC

70

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

A 2005. évi fizikai Nobel-díj (<i>Csőrgő Tamás</i>)	72
---	----

PÁLYÁZATOK

72

N. Kroó: The future of fundamental research, especially in Europe

Z. Fodor: The phase diagram of strong interaction

G. Bárdossy: What we at present know about tsunamis and their causes

I. Vincze: Magnetism: the progress of science and craft in recent decades

G. Vajda: Energy supply in the 21st century

TEACHING PHYSICS

P. Hraskó: Teaching relativity theory

FAREWELL

Ferenc Nágel, 1931–2005 (*S. Holló, L. Ugródsy*)

EVENTS, BOOKS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

The Nobel prize in physics 2005 (*T. Csörgő*)

TENDERS

N. Kroó: Die Zukunft der Grundlagenforschung, insbesondere in Europa

Z. Fodor: Das Phasendiagramm der starken Wechselwirkung

G. Bárdossy: Was wir heute über Tsunamis und ihre Ursachen wissen

I. Vincze: Magnetismus: Fortschritte der letzten 35 Jahre

G. Vajda: Energieversorgung im 21. Jahrhundert

PHYSIKUNTERRICHT

P. Hraskó: Das Lehren der Relativitätstheorie

WIR NEHMEN ABSCHIED

Ferenc Nágel, 1931–2005 (*S. Holló, L. Ugródsy*)

EREIGNISSE, BÜCHER

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Das Nobelpreis in Physik 2005 (*T. Csörgő*)

AUSSCHREIBUNGEN

H. Kroó: Перспективы фундаментальных исследований, особенно в Европе

Э. Фодор: Фазовый портрет сильного взаимодействия

Г. Бардосси: Что мы уже знаем о цунами

И. Винце: Наука и техника магнетизма: прогресс последних десятилетий

Г. Вайда: Снабжение энергией в 21-м столетии

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

П. Храско: Обучение теории относительности

ПРОЩАЕМСЯ

Ференц Нагель, 1931–2005 (*С. Холло, Л. Угроуди*)

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, КНИГИ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Нобелевская премия по физике 2005 года (*Т. Чёргё*)

ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

2. szám

2006. február

AZ ALAPKUTATÁSOK JÖVŐJE, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL EURÓPÁRA

Kroó Norbert
az MTA alelnöke,
KFKI, SZFKI

Az Egyesült Államok tudományos fejlődése a II. világháború után igazi sikertörténet. Mindnyájan szemtanúi voltunk annak a rohamos fejlődésnek, amely az Egyesült Államok tudományát a világ csúcsára emelte. Ennek több oka van. Az első, és talán a legfontosabb, hogy a győztes világháború után a tudomány erős társadalmi támogatottságot élvezett. Mindez annak köszönhető, hogy a megnyert háború, az atombomba és azok a gyógyászati újdonságok, amelyek a háborúban születtek, a háború után javították a társadalom életminőségét is. Ezért *Vannevar Bush* amerikai szenátor a *Science the endless frontier* című könyvében joggal alapozhatta meg társadalmi támogatottsággal az amerikai tudománypolitika alapjait. Tudománypolitikájának lényege az volt, hogy az alapkutatásokat közpénzekből kell finanszírozni és teljesen nyitottá kell tenni. Biztosítani kell a tudomány szabadságát, a tudományos intézetek autonómiáját és létre kell hozni a professzionális kutatóintézetek hálózatát, amelyek segítségével a bonyolult feladatok megoldásához szükséges kritikus méret, a nagy bonyolultságú infrastruktúra, a professzionális menedzsment és egy sor más feltétel jobban biztosítható. Bevezették a tudományban a versenyt. A minőség alapján a legjobbakat finanszírozták, valamint a kutatási eredmények duális alkalmazását, civil és védelmi célokra egyaránt.

Mi lett mindennek az eredménye? Az Egyesült Államok a világ vezető gazdasága és hatalma lett. Megalapozták a tudás alapú gazdaságot és megteremtették az alapot a tudásimporthoz. Nagyon jó hatásokkal megvalósították az agyelszívást nemcsak az egyetemi hallgatók, de az egyetemi oktatók és kutatók szintjén is. De említhetném Finnország, Írország, Tajvan vagy Dél-Korea példáját is, akik ugyan később, de hasonló útra léptek, és az eredményeiket már napjainkban tapasztalhatjuk. Mindez ahhoz a megállapításhoz vezet, amelyet az előbbi példák történelmi bizonyossága is jól mutat: *az alapkutatások finanszírozása jó befektetés.*

Miért érdemes alapkutatásokat végezni, illetve finanszírozni?

Nyilvánvaló, hogy a kutatókat elsősorban a megismerés vágya ösztönzi. Az, hogy kövessék a világ fejlődését, sőt, bizonyos területeken előtte járjanak. A tudásgenerálás, a képességfejlesztés, a hosszú távra alkalmas kutatási infrastruktúra fenntartása mind olyan tényezők, amelyek az alapkutatásban gyökereznek. De a problémamegoldás, akár a környezetvédelemben, akár az egészségügyben, a gazdasághoz, vagy a társadalmi problémákhoz kapcsolódó kérdésekben ugyancsak motiválja az alapkutatásokat, azért, hogy jobb vagy olcsóbb termékek szülessenek, hogy jobb vagy hatékonyabb szolgáltatások álljanak rendelkezésünkre. A PhD és posztdoktori képzés ugyancsak az alapkutatásokra támaszkodik, hiszen ezek izgalmas és kihívásokkal teli kutatási környezetet jelentenek, amelyekben egy alkotni vágyó fiatal mindig megtalálhatja a helyét. Végezetül még egy dolog. Néhány évtizeddel ezelőtt még az anyagi tőke vonzotta magához a szellemi tőkét, manapság ennek iránya megfordult: a szellemi tőkéhez vonzódik az anyagi tőke.

Az alapkutatások haszna tehát, hogy tudástőkét teremt a diszciplínák széles spektrumában. A tudástőke alapján kibontakozó tanácsokat felhasználhatják a döntéshozók akár nemzeti, akár regionális kormány szervezeti szinten. Az erős alapkutatás belépőjegyet jelent a nemzetközi kutatási közösség klubjába, a globális tudományos faluba, hiszen a tudomány a globalizáció első sikeres példája. Ebben a klubban pedig formális együttműködéssel, konferenciákon való részvétellel, informális személyi kapcsolatokkal egyrészt hozzá lehet járulni a hazai tudástőke gazdagításához mások eredményeinek átvételével, másrészt segítséget jelent abban is, hogy egyáltalán megértsük mások alkotásait, elméleteit, és ne ismételjük meg ugyanazokat a kutatásokat. Az alapkutatás haszna az is, hogy az akadémiai és a gazdasági szférák közötti kapcsolat erősíté-

sében fontos szerepet játszhat, de talán a legfontosabb hasznosulása az oktatásban és a képzésben, a következő tudósgenerációk nevelésében mutatkozik meg.

Az eddigiekben a nyitott tudományról szóltam, most ennek fontosságát igyekszem hangsúlyozni. Természetesen ez a nyitottság csak az alap- és a stratégiai kutatásokban valósítható meg, de eredményei jól hasznosíthatók mind az alkalmazott kutatásban, mind a technológiai fejlesztésben.

Sokszor hangsúlyoztuk már, hogy manapság a tudományban forradalom zajlik. A forradalom elsősorban három terület körül csúcsosodik ki; a nano-tudományok és -technológiák, az információs tudományok és technológiák, valamint a bio-tudományok és -technológiák területén. Azt hiszem, hogy tíz-húsz év múlva gyökeresen más prioritások lesznek jellemzők a tudományban Földünkön, és erre a gyökeresen új helyzetre időben, már most fel kell készülnünk. A felkészülésnek az alapkutatókból kell és lehet elindulnia.

Az európai helyzet

Tekintsük át mindezt most egész Európára vonatkozóan. Európa hagyományai a tudományos kutatás területén igen gazdagok. Itt zajlott le a 19. század elején az ipari, végén pedig a mezőgazdasági forradalom, továbbá a modern tudományok bölcsője is Európában ringott. A fejlődés azonban a II. világháború vérvivatairaiban megtorpant, és ez a megtorpanás a háború után is folytatódott. Európa nem tudta ellensúlyozni az Amerikai Egyesült Államok fejlődését, ami elsősorban a természetes módon növekvő agyelszívásban mutatkozott meg. Nagyszámú európai (és magyar) tehetség találta meg boldogulását az Egyesült Államokban. Az Európai Unió felismerte ennek jelentőségét, és a *kutatási-fejlesztési keretprogramok* segítségével az agyelszívás megállítását, esetleges megfordítását tűzte ki elsőrendű céljául. Mindez még a hidegháború idején történt, amikor elsősorban nemzetbiztonsági szempontok alapján úgy gondolták, hogy az alapkutatásokat nemzeti keretek között kell folytatni. A helyzet a 90-es évek elején változott meg, amikor a vasfüggöny leomlása és a hidegháború befejezése után, a prioritások a versenyképesség és a munkahelyteremtés felé irányultak. Eközben az előbb említett keretprogramokban az alkalmazott kutatások képezték a fő súlypontokat. Időközben erősödött az a felismerés, hogy a jövőben az alapkutatások szerepe meghatározó lesz. Ezért született meg 2000-ben az Európai Unió csúcsszerveinek az a döntése, hogy Európának törekednie kell a kutatás megerősítésére. Ez az európai kutatási térség koncepciójában fogalmazódott meg, valamint abban a javaslatban, hogy 2010 körül Európának a vezető tudás alapú gazdasággá kell válnia a világon. Ehhez két évvel később Barcelonában az anyagi feltételek kérdésében is döntés született. Az ajánlásban azt a célt tűzték ki, hogy a tagországok 2010-ig növeljék a kutatás-fejlesztési ráfordításait a nemzeti jövedelmük (GDP) 3 százalékának erejéig. Elkezdődött a 7. keretprogram tervezése is. A kutatás fontosságát hangsúlyozandó, ennek anyagi kereteit a már jelenleg is zajló 6. keretprogram költségáfordításának

duplájára tervezték, de a jelenleg érvényes, a parlament által még nem elfogadott tervek szerint is lényegesen magasabb lesz, mint a 6. keretprogramban. Növekvő hangsúlyt kapott az alapkutatások európai szinten történő megerősítése is.

Tekintsük át, hogy melyek az európai alapkutatások gyenge pontjai. Az első, hogy *alacsony szintű az együttműködés* a stratégiai prioritások mentén. Ennek javítása érdekében erősíteni kell az együttműködést a tematikailag orientált stratégiai kutatási programokban az integrált programok létrehozásával, a kiválósági központok hálózatba szervezésével, valamint a stratégiai fontosságú problémák felkarolásával.

A második gyenge pont a *kutatás fragmentáltsága*. Ezt kiküszöbölendő az Európai Unió nemzeti kutatási programok koordinációját tervezi különböző formában. Ilyenek az európai kutatási térséghez kapcsolódó elgondolások, valamint a Római Szerződés 169. paragrafusával kínált lehetőség, amely néhány tagországnak is lehetővé teszi, hogy adott konkrét program megvalósítása érdekében összefogjon. A fragmentáció csökkentését számos indok motiválja. Ez ugyanis korlátozza a fiatal kutatók flexibilis karrierlehetőségeit, a határokon átnyúló együttműködést és finanszírozást, az egymástól való tanulást, a bonyolult feladatok esetében szükséges kritikus tömegek elérését – különösen a kis országokban – az új európai uniós tagok integrációját, a legjobb módszerek megvalósítását és értékelését, végül a kiválósági központok erősítését, számuk növelését.

A harmadik gyenge pont, hogy *kevés a pénz* a képzésre, a mobilitásra és a kutatási infrastruktúrára. Ezért a kutatási kapacitás bővítése érdekében számos elképzelés fogalmazódott meg. Például a nemzeti ráfordítások 3 százalékra növelése a 7. keretprogram pénzügyi kereteinek megduplázásán felül. Éppen azért, hogy a nemzeti finanszírozásban zajló kutatások és a nemzetközi kutatások ellentmondását fel lehessen oldani. Nemzeti és európai szintű, új kutatási berendezések létrehozásával kell vonzó kutatási feltételeket teremteni.

A negyedik gyenge pont a *tudományos-technológiai kohézió hiánya*. Ennek megteremtése és megvalósítása érdekében az iparral együtt úgynevezett európai technológiai platformok létrehozása van folyamatban.

Végül az ötödik gyenge pontja az európai kutatásoknak, hogy *kevés a kiváló kutatás és kutatócsapat*. A helyzetet javítandó azt tervezi az Unió, és ez már a megvalósítás fázisába is lépett, hogy a tudomány belső logikájából következő alapkutatási programokat európai szinten megerősítik. Mégpedig olyan módon, hogy a kiválóságot fokozottan elismerik az alapkutatásban, és ezt megfelelően finanszírozzák (jelenleg ugyanis nincs európai szintű alapkutatási finanszírozás). A kutatók toborzása és képzése, valamint karrierpályájának javítása ugyancsak egyike a kitűzött céloknak, amitől azt várják, hogy az új kutatómérnöki állások száma mintegy 700 000-rel nő 2010-ig. Ennek megvalósításához persze megfelelő infrastruktúrára is szükség van, amely vonzóvá teszi a kutatási lehetőségeket. Ennek érdekében az Európai Unió azt tervezi, hogy a létező nemzeti berendezések esetében is, mind a tervezés, mind a megvalósítás és üzemeltetés fázisában anyagilag is

részt vesz. Természetesen fontos az európai tudásbővítés szempontjából a gyengébb régiók potenciáljának jobb kihasználása és fejlesztése is. Összeurópai konszenzus alapján az a megállapodás született, hogy miként azt a döntést előkészítő bizottság ajánlásaiban megfogalmazta, egy Európai Kutatási Tanács létrehozása a megoldás kulcsa. Ez az Európai Kutatási Tanács egy autonóm szervezet lenne, támogatását az Európai Unió költségvetéséből kapná, mégpedig a 7. keretprogram egy speciális programjaként. Nem a program többi elemének rovására finanszíroznák, és nem azokkal azonos módon, hanem „grantok” formájában, mintegy másfél milliárd eurós évi költségvetéssel. Pénzügyi felelősséggel a Tanács természetesen az Európai Bizottságnak tartozik, hiszen a keretprogram egészének pénzeiért a felelősséget ez a testület viseli. Az Európai Kutatási Tanács létrejötte azt eredményezné, hogy hosszabb távú elkötelezettség teremthetne meg a kutatásban. A Tanács működtetésében az irányítást egy 22 tagú Tudományos Tanács (ez a Tanács egyébként már működik) végzi, amelynek döntéseit egy végrehajtó ügynökség teljesíti a lehetséges minimális bürokráciával és egyetlen kiválasztási szabállyal, a szakmai kiválósággal. Ez a testület finanszírozni lesz képes akár a csoport- vagy egyéni szintű kiváló kutatásokat is az Európai Unió bármelyik országában, mégpedig úgy, hogy a világ bármelyik részéről részt vehetnek benne kutatók. Különösen támogatná a multidiszciplináris és a nagy kockázatú kutatásokat, például új területeken. Talán azt lehetne mondani, hogy a finanszírozás a prekompetitív, stratégiai kutatásokat fogja érinteni. Másképpen fogalmazva: *a versenyképességet megalapozó kutatások finanszírozása* és nem a versenyképesség finanszírozása a cél.

Az Európai Bizottság, ezeket az ajánlásokat megfogadva, válaszait a következőképpen fogalmazta meg. Négy specifikus programot tervez a 7. keretprogramon belül, amelyek egyike a *kollaboratív kutatások támogatása*. A kollaboratív kutatások hasonlóak a jelenlegi keretprogramban folyó kutatásokhoz, de volumenben nagyobbak. Ezek a kutatások több országban, több kutatócsoport által, összefogással megfogalmazott feladatok megoldására irányulnak.

A másik specifikus program az *emberi erőforrás fejlesztése*. Ez a program tulajdonképpen a Marie Curie-ösztöndíjrendszer egy javított változatát tartalmazza. A lényeges változást a nemzeti formák bekapcsolása jelenti, valamint a nagyobb anyagi keret. Ugyancsak e program része a mobilitás növelése és Európa vonzóbbá tétele más országok kutatói számára.

A *kutatási kapacitás fejlesztése* a harmadik specifikus program, amely az infrastruktúra fejlesztését is magában foglalja. A kutatási kapacitás fejlesztése az új tagországok esetében a strukturális alapok bekapcsolásával is számol, a tudásrégiók létrehozását, valamint a gazdasággal való kapcsolat megerősítését jelenti – például olyan módon, hogy kiemelten támogatja a kis- és középvállalatokat, az ipari prioritásokat és megpróbál egyszerűbb módon gazdálkodni, megpróbálja a formalitásokat egyszerűsíteni. E témakörhöz tartozik az is, hogy a Bizottság fontosnak tartja a tudomány és a társadalom kapcsolatrendszerének erősítését is.

Végül a negyedik specifikus program a már említett Európai Kutatási Tanácshoz kötődik, amelyet jelenleg *Ideák* cím alatt fogalmaztak meg. Ez a program átvette az előbb megfogalmazott ajánlásokat, és igen erős politikai támogatást élvez. A 22 fős Tudományos Tanács megszületett, megválasztotta elnökét, két alelnökét, és jelenleg kidolgozás alatt van az a működési rendszer, amelynek alapját a már előbb megfogalmazott elvárások jelentik. A kutatóközösség részéről is általános támogatottságot élvez a Tanács. Nyilvánvaló, hogy ez a jövőre nézve a 22 tagra óriási felelősséget hárít, hiszen rajtuk múlik az európai alapkutatások jelentős hányadának jövője.

Hozzáteszem, hogy a 7. keretprogramban is jelentős alapkutatási feladatok fogalmazódtak meg, nemcsak ezekben a specifikus programokban. Az Európai Kutatási Tanács létrejötte rendkívül pozitív, véleményem szerint paradigmaváltást jelentő fejlemény, azonban veszélyeket is jelent. Az egyik veszély, hogy a tagok megpróbálják otthoni gyakorlatukat átplántálni a Tanács működésébe. Veszélyforrást jelent az is, hogy az alulról fölfelé irányuló (bottom up) és a felülről lefelé irányuló (top down) megközelítések nem mindig azonosak. A kutatói közösség nem biztos, hogy olyan prioritásokat fogalmaz meg, mint amilyeneket a politika. Előfordulhat az is, hogy a nemzeti kormányok úgy gondolják, hogy az alapkutatásokat az Európai Unió finanszírozza, ők pedig kivonulhatnak erről a területről. Ennél nagyobb hibát egyetlen ország sem követhetne el. Veszélyes gondolat az is, amely néhány országban máris megfogalmazódott, hogy annyi pénzt kapjanak vissza, amennyit ebbe a programba befizettek. Ez nyilvánvalóan a „fából vaskarika” tipikus esete, hiszen éppen azért jött létre ez a Tudományos Tanács, hogy a versenyképességet európai szintre emelve a minőséget javítsa, és a legjobbakat finanszírozza függetlenül attól, hogy melyik országban tevékenykednek. Vannak a politika részéről furcsállható ötletek is, például, hogy létre kell hozni egy európai Műszaki Egyetemet, és ezt kell az *Ideák* specifikus program keretében finanszírozni, nem az alapkutatásokat.

Összefoglalva a fentiek elmondható, hogy Európa jó irányba mozdult el. Amennyiben az Európai Kutatási Tanács segítségével a 7. keretprogramban megfogalmazott célok és feladatok a gyakorlatba átültetődnek, akkor Európa esélyt kap arra, hogy az Egyesült Államok mögötti lemaradását, legalábbis részben, behozza.

A magyarországi viszonyok és teendőink

A fentiekben az Európai Unió erőfeszítéseiről volt szó. Térjünk most át Magyarországra. Mi a helyzet nálunk?

A magyar tudomány hírneve még mindig csillog. Sokan tapasztalhattuk már, hogy külföldön jó magyar kutatónak lenni. Ez annak a hazai erősségünknek is köszönhető, amelyre a külföld mindig feltekint, vagyis a magyarországi alapkutatások előkelő helyére a világranglistán, hiszen különböző tudományterületeken a 15. és a 30. hely között vagyunk ezen a listán. Ugyanakkor óriási a lemaradás veszélye, hiszen rendkívül szerény költségvetéssel gazdálkodunk, amely az európai uniós költségvetési ráfordítás átlagának alig a fele – nem is szólva az élen haladókról,

Finnországról, Svédországról, amelyek már az idén teljesítették a 3 százalékos uniós elvárását. Ráadásul ez a ráfordítás is bizonytalan, évről évre változó módon, változó intenzitással kell minden fillérért megküzdeni. Alacsony a kutatói létszám is. Az európai uniós átlag alig több mint fele, és messze lemarad Finnország és Svédország mögött. Nagy az egyetemek dilemmája is a tömegképzés és az elitképzés megfelelő arányának kialakításában és a kutatás ebben játszott szerepében. Pozitívnak tartom, hogy a Magyar Tudományos Akadémia presztízse nemzetközi szinten és a hazai társadalomban is magas, amelyet elsősorban kutatóhálózata eredményességének, az eredmények folyamatos értékelésének, egy középtávú koncepció meglétének és többé-kevésbé tudatos megvalósításának köszönhet. Fémjelzi az Akadémia megbecsültségét az a munka is, amelyet a Nemzeti Fejlesztési Terv következő fázisának előkészítésében és kialakításában végzett. Jócskán vannak gyenge pontok a magyar kutatási hálózatban. Kevés a kiváló kutató és mérnök, és a mobilitás is egyirányú: elsősorban tőlünk külföldre irányul és sokkal kisebb mértékben külföldről hazánkba. Az infrastruktúra használati értéke alacsony, működtetése nehézkes a forráshiány miatt. Európával összhangban Magyarországon is gyenge a tudományos-technológiai kohézió. Nálunk is fragmentált a kutatás, kiszámíthatatlan a pályázati rendszer. Bizonytalan az éves költségvetés, és hiányzik a koherencia a finanszírozók között. Hiányzik ugyanakkor egy országos kutatási stratégia is. Ez a helyzet különösen 2007-től kezdődően kritikus, amikor az Európai Unió strukturális alapjaiból jelentős összeg jöhetne Magyarországra. De nincs országos szintű helyzetfelmérés és előrettekintés sem. Ezért a finanszírozók saját jó vagy rossz benyomásaik alapján döntenek jól vagy rosszul a kutatás-fejlesztésre fordítható pénzek sorsáról.

Mindezen megállapítások fényében nézzük meg, melyek azok a teendők, amelyeket véleményem szerint szükséges lenne elvégezni. A tudásalap fejlesztése Magyarországon is elkerülhetetlen. Hiszen az egyetlen olyan erőforrás, amely a használat során nem fogy, sőt, gyarapszik – természetesen az emberi erőforrás. Ennek erősítése elsősorban az elitképzésen keresztül valósulhat meg. A doktori iskolák végzik ezt a feladatot, de jó lenne, ha Magyarországon is lennének olyan kutatói iskolák, mint amilyet például a németországi Max Planck Társaság működtet. A posztdoktori képzés természetesen ugyancsak növekvő fontosságú a kutatásban. A Magyar Tudományos Akadémia ennek szellemében működteti a fiatal kutatói állások, valamint a Bolyai-ösztöndíjak rendszerét. El kellene érni, hogy minél több külföldön dolgozó fiatal magyar kutató térjen haza, valamint változtatni kellene azon a furcsa helyzeten, hogy a hölgyek létszáma a kutatásban, és különösen a döntéshozói helyzetben lévő pozíciókban rendkívül alacsony. Szégyenteljesen alacsony a hölgyek száma a Magyar Tudományos Akadémia tagjai között is. Égető szükség lenne arra is, hogy multidiszciplináris karrier utakat alakítsunk ki, amelyek igazodnak ahhoz a felismeréshez, hogy a 21. század elsősorban a multidiszciplináris kutatások százada. A kutatókat fel kell készíteni a váratlanra, hiszen a nagy felfedezések mindig váratlanul, szinte véletlenül születnek. S végezetül nagy

szükség lenne arra is, hogy a kutatói gárda önbizalmát növeljük. Gyakran tapasztalom, hogy magyar kutatók, nemzetközi szinten is, önbizalom hiányában nem úgy szerepelnek, mint ahogy tudásuk és eredményeik alapján ezt joggal megtehetnék.

Hadd térjek ki röviden az infrastruktúrára. Két olyan infrastruktúránk van, amelyek szerencsére jól működnek, és amelyeket feltétlenül meg kellene tartanunk sőt, erősíteniünk. Az egyik a nemzeti informatikai infrastrukturális hálózat, amelyen keresztül a kutatók belföldön és külföldön lévő kollégáikkal kommunikálhatnak, nagy mennyiségű adatokat is továbbítva. Ilyen módon ez az infrastruktúra a nemzetközi együttműködés eszköze is. A másik az elektronikus könyvtárszolgáltatás, amely az interneten keresztül elérhetővé teszi a folyóiratok széles körének elérését a kutatók számára. Fontos feladat azonban a műszerközpontok hálózatba kötése, a gazdaság számára is hasznos berendezések létrehozása, fejlesztése (elsősorban kis, esetleg közepes méretű berendezésekre gondolok). A kis országoknak, így Magyarországnak is elsősorban erre kellene koncentrálnia. A jelenlegi alulfinanszírozott helyzet változtatásokat követel, amelyek természetesen csak beruházásokkal érhetőek el. Ami a nagyberendezéseket illeti, ezek felhasználása a kutatásban igen fontos, de ilyeneket Magyarország egymaga nem építhet. A nemzetközi lehetőségeket kell kihasználni, kétoldalú vagy európai együttműködések formájában. Természetesen nagy szükség lenne arra, hogy az alapeszközök használati értékét növeljük – gondolok például a KFKI-ban működő kutatóreaktorra, amely nemzetközi szinten is cserealapot teremt számunkra. Be kell tehát lépni bizonyos európai nagyberendezéseket működtető szervezetek tagjai közé is. Ezt, ha más nem, az európai szolidaritás is elvárja tőlünk.

Ami az intézményrendszert illeti, ennek autonómiája Magyarországon ugyanúgy, mint a világon, nagyon fontos. A tudomány képtelen négyéves ciklusokban gondolkodni, hosszabb távot átívelő intervallumokban kell tervezniük, ami csak autonómia útján lehetséges. Úgy vélem, hogy a Magyar Tudományos Akadémia kutatóhálózata ilyen autonóm hálózat, amelynek működése országos szinten kiemelkedő, ami nem jelenti azt, hogy hatékonysága nem javítható. Számos olyan elképzelés van, amely e hálózat működését tovább javíthatná. Egy azonban biztos, hogy ez a cél csak akkor érhető el, hogyha ezt a hálózatot politikától távol lehet tartani. Szükség lenne az intézményrendszeren belül egyfajta egészséges munkamegosztásra az egyetemek és a kutatóintézetek, a kutatói szféra és a gazdaság között, amely nem egyoldalú, hanem kétoldalú megközelítést igényel. Nemcsak a kutatói hálózatnak kell közelednie a gazdasághoz, hanem fordítva, a gazdaságnak is a kutatáshoz és annak intézményrendszeréhez. Ennek nemcsak szavakban, de tettekben is meg kell nyilvánulnia.

A hatékonyság növelése fontos teendő. A folyamatos értékelés, az alapellátás rendbetétele, a kritikus tömeg eléréséhez szükséges szervezési feltételek megteremtése, valamint a koordináció javítása ebbe az irányba ható feladatok. Ugyanakkor tudomásul kell venni, hogy a tudomány versenyszféra nemzeti és nemzetközi szinten egy-

aránt, és úgy kell versenyeznünk a partnerekkel, hogy közben együttműködünk. Ennek technikája mindenhol kialakítás állapotában van, és nekünk is meg kell ezt tennünk. Intézményesített együttműködésre lenne szükség a képzésben és a kutatásban is. Itt is akad bőven tennivaló. A kiválósági központok és hálózataik Európában megvalósulnak, Magyarországon is meg kell ezért küzdenünk. Egyrészt össze kell kötni kiválósági központjainkat az európai partnerekkel, másrészt új együttműködési lehetőségeket találni számukra. Jó lenne, ha Magyarországon is megvalósulna az az Európában már egyre általánosabbá váló gyakorlat, hogy alapítványi formában is finanszírozódik a tudományos kutatás. Végül megemlítem, hogy új és pozitív fejleménye a tudományos kutatásnak: a pénz az egyénhez kötődik. Azokhoz a kiemelkedő egyéniségekhez, akikről az eredmények is elvárhatók.

Hadd említsek néhány gondolatot a tudománypolitikáról. A tudománypolitika rendkívüli fontosságát egy példán, Írország példáján szemléltetem. Ha Írország európai uniós tagságának első 20 évét tekintjük, akkor az első 10 évben az uniós támogatás sokkal magasabb volt, mint a második szakaszban. Ennek ellenére az első 10 évben Írország csak vergődött, a második 10 évben pedig rohamos fejlődésnek indult. Ennek oka, hogy felismerték, az előre vezető utat a kutatás és a képzés fokozott támogatása jelenti. Miután ezen az úton indultak el, hamarosan az eredmény is megérkezett. Magyarországnak az elől haladók utol kellene érnie. Így nekünk még jobban kell végeznünk dolgainkat, mint másoknak. Sőt, nemcsak jobban, de gyorsabban is kell lépkednünk. Ez véleményem szerint csak úgy érhető el, hogyha elsősorban az erőseket támogatjuk, és nem a gyengék felzárkóztatását fogalmazzuk meg prioritásként. Ezért az erős magyar prekompetitív kutatásra kell építenünk, és ebből kell kicsikarnunk a maximális hasznot. A világpélda mindenképp azt mutatja, hogy ez a jó befektetés. Természetesen számolnunk kell a magyar specifikumokkal, a gyógyszerkutatásban, az agykutatásban, a mezőgazdasági kutatásban, az informatikai és anyagkutatásokban lévő kiváló kutatógárdánkkal, de azzal is, hogy Magyarországon a multinacionális vállalkozások nagyon erősek és nagy számban vannak jelen. Ezek háttériparának, valamint a kis- és középvállalatok támogatása Magyarországon talán még fontosabb, mint máshol. Nem kerülhet el az sem, hogy néhány új területre is odafigyeljünk, és ott megfelelő erőfeszítéssel próbáljunk felkapaszkodni a gyorsan és egyre gyorsuló módon haladó vonatra. Ilyennek tartom például a nano-kutatások bizonyos részét. Ezek megfelelő arányának kialakítása a tradíciókra alapozott kutatásokhoz viszonyítva ugyancsak fontos tudománypolitikai feladatunk.

Jelenünk egyik fontos változása, amelyet világszerte tapasztalhatunk, a társadalomtudományok növekvő jelentősége. Különösen így van ez akkor, ha a társadalomtudományok tevékenysége összekapcsolódik a természettudományos kutatással. Hadd említsek egy példát: nem tudok elképzelni eredményes környezetvédelmi kutatásokat a társadalomtudományok erős jelenléte nélkül.

Fontosnak tartom – ezt már a korábbiakban is említettem – a finanszírozás stabilitását. Stabilitást a pályázati rendszerben és pontosan megfogalmazott, jól körülírt

elvárásokat. Figyelniük kell azokra az ötletekre is, amelyek felhasználásával hatékonyabban végezhetjük feladatainkat. Ne féljünk elveszni mások ötleteit, de a saját ötleteinket is bátrabban valósítsuk meg. Végül, de nem utolsósorban biztonsággal mondhatom, színvonalas kutatás és tudománypolitika csak a szakmai közösség minőségkontrollja mellett képzelhető el.

Magyarország az Európai Unió tagja. Gyakran azonban nem úgy viselkedünk, hanem úgy, mintha csak szetrenénk csatlakozni. Tudomásul kell vennünk, hogy az Európai Unió nem egy föderatív képződmény, itt a nemzeti érdekek képviselője fontos szerepet játszik. Nem szabad erről megfeledkeznünk, és nem szabad magunkat a másodrendű állampolgárok kategóriájába sorolhatni. Joggal várhatjuk el, hogy a pályázatok azonos feltételekkel legyenek elérhetőek számunkra, mint másoknak, ugyanolyan mértékkel kell mérni egy magyar kutatócsoportot, mint egy német, angol vagy francia kutatócsoport esetében. Ugyanazt a színvonalat kell elvárni, de nem szabad elfogadni a negatív diszkriminációt sem. Azt gondolom, hogy ha ilyen előfordul, és erre már volt több példa, annak hangot kell adni és ki kell kérni magunknak. Az európai szolidaritás viszont ránk is kötelező, ezért az összeurópai programokban való részvétel alól nem húzhatjuk ki magunkat. Ezek jelentős része a 7. keretprogram kollaboratív kutatásaiban fogalmazódik meg, amelyben még sok tartalék, lehetőség van a növekvő és javuló részvételünk érdekében. Mindez azonban csak úgy lehetséges, ha elmaradásunkat valamilyen más forrásból csökkentjük. Erre megfelelő forrásnak tartom a strukturális alapokat, amelyek növekvő hányadát kell a kutatás-fejlesztés infrastruktúrájának javítására költeni annak érdekében, hogy azonos feltételekkel tudjunk versenyezni nyugati kollégáinkkal.

Az Európai Kutatási Tanács nagy ígéret és nagy lehetőség. Ennek munkájában, a pályázati rendszer kialakításában és magukban a pályázatokban a magyar kutatói közösségnek is részt kell vennie. Meg vagyok győződve arról, hogy ezt meg tudjuk tenni, és eredményesen fogunk pályázni európai szinten is. Persze ehhez számos feltételnek kell teljesülnie: a magyar kutatástámogatásnak is paradigmaváltáson kell keresztülmennie, a pályázati összegeknek növekedniük, a stabilitásnak erősödniük kell, és a koncepcióknak időtállóknak és jól kidolgozottaknak kell lenniük.

Összefoglalva: Magyarország versenyképességét az erős prekompetitív kutatás alapozhatja meg. Ahhoz, hogy versenyezni tudjunk és ne maradjunk le, a többiekénél is jobban kell végeznünk feladatainkat, hiszen elmaradást kell behoznunk. Nyilvánvaló, hogy előrehaladásunkhoz nemcsak az anyagi háttér javítása, hanem szemléletváltás is szükségeltetik. Európai Uniós tagságunk bővülő külső erőforrásokat is jelent, ugyanakkor erősebb versenyhelyzetet teremt. Ebben a versenyben helyt kell állnunk, és ki kell harcolnunk azokat az anyagi forrásokat, amelyeket az Európai Unió pontosan ilyen célok érdekében működtet. Azt azonban tudnunk kell, hogy az alapvető kérdéseket csak mi magunk oldhatjuk meg, ebben másokra nem támaszkodhatunk, és éppen itt az ideje, hogy ezt meg is tegyünk.

AZ ERŐS KÖLCSÖNHATÁS FÁZISDIAGRAMJA

Fodor Zoltán
ELTE TTK Elméleti Fizika Tanszék

Az elemi részek fizikája a világ legkisebb és legalapvetőbb építőelemeivel foglalkozik. A leggyakoribb vizsgálati eljárás ezen részecskék ütköztetése valamely részecskegyorsítóban. Ilyenkor néhány nagyenergiás részecske vesz részt a folyamatban. Sokkal több nagyenergiás elemi részecskével találkozhatunk bizonyos szélsőséges esetekben. Ilyen például a korai Világegyetem, a neutroncsillagok belseje vagy a nehézionok ütközése. Ezen fizikai folyamatok, történések segítségével lelapogathatjuk a részecskefizikai elmélet fázisdiagramjának egyes részeit.

A jelenségkör leíró fizikai elmélet a *kvantum-színdinamika*, az erős kölcsönhatás elmélete. Ez a kölcsönhatás rendkívül erős. Töltéseinek szétválasztásakor az elektromosságban szokásos $1/r$ típusú lecsengő potenciál helyett egy minden határon túl növekvő lineáris potenciál jelenik meg. Ez a tulajdonság felel azért, hogy a protonokban található három kvark bezáródott. Közöséges körülmények között nem nyílik lehetőség szabad kvarkok észlelésére. Az energia növelésével a kölcsönhatás gyengül. Ez fázisátmenethez vezethet, melynek során a bezárt kvarkok kiszabadulnak. Ilyen nagy energiák jelennek meg magas hőmérsékleten (ilyenkor az egy szabadsági fokra jutó energia nagy) vagy nagy sűrűségek esetén (ilyenkor a fermionok a Pauli-féle kizárási elv miatt kerülnek egyre magasabb és magasabb energiaszintekre).

Egy rendszer fázisait a szokott módon a fázisdiagram segítségével jellemezhetjük. Az *1. ábra* sematikus mutatja a víz hétköznapi életben megjelenő fázisainak a hőmérséklet és nyomás síkján felvett fázisdiagramját. A folytonos vonalak elsőrendű fázisátmenetet mutatnak, míg a pontozott rész az úgynevezett analitikus átmenet (cross-over) tartomány. A rendparaméternek tekinthető sűrűség a cross-overen való áthaladáskor is gyorsan változik, de a fázisátmenetekre jellemző szingularitás nem jelenik meg. A fázisdiagram számunkra legfontosabb tulajdonsága a kritikus „végpont” megjelenése. A víz 374 fokon és 0,32 kg/l sűrűségen opálóssá válik, makroszkopikus méretű korrelációk alakulnak ki. Érdeemes megjegyezni, hogy ez a fizikai állapot akár egy gázláng segítségével már megvalósítható (bár a fellépő nagy nyomás miatt meglehetősen erős tartályra van szükség).

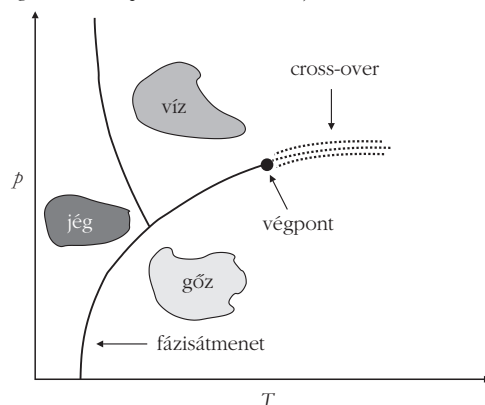
A víz fázisdiagramja arra a kérdésre keresi a választ, hogy mi történik a vízzel, ha egyre jobban melegítjük, vagy egyre jobban összenyomjuk. A kérdést a részecskefizikában sokkal általánosabban is feltehetjük. Mi történik a „semmivel”, a vákuummal, ha egyre jobban melegítjük? Mi történik bármilyen anyaggal,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

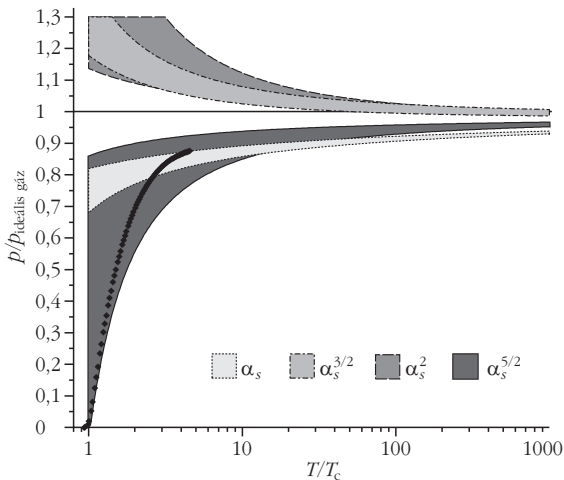
Ezekre a kérdésekre az erős kölcsönhatás ad választ. Ez a kölcsönhatás, pontosabban ezen kölcsönhatásnak egy legyengített, leárnnyékolt fajtája felel a magerők nagyságáért, az atombomba pusztító erejéért. A jelen írás célja az erős kölcsönhatás fázisdiagramjának bemutatása.

A részecskefizika kölcsönhatásait (a már említett erős kölcsönhatás mellett ilyen a radioaktív béta-bomlásért felelős gyenge kölcsönhatás és a fotonokat leíró kvantumelektrodinamika) a kvantum-mezőelméletek adják meg. Ezen elméletek egyrészt mezőelméletek (más szóhasználattal térelméletek), azaz a dinamikai változókat, mezőket (más szóhasználattal tereket) a geometriai tér pontjaihoz rendeljük. Ilyen klasszikus példa a meteorológia. A hőmérséklet, nyomás, szélesség a tér különböző pontjaiban más és más, és időben fejlődik. A kvantum-mezőelméletek másik jellemzője, hogy kvantált elméletek. A legismertebb példa a kvantált elméletekre 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 a test energiája nem lehet tetszőleges, hanem csak bizonyos meghatározott érték. Az energia kvantált. A kvantum-mezőelméletek ezen két fizikai leírasi mód ötvözéséből születtek. A dinamikai változók a mezők, melyeket a meteorológiával ellentétben már nem számokkal, hanem egymással fel nem cserélhető operátorokkal írunk le. Ezen elmélet szerint is az energiaszintek meghatározottak, kvantáltak. Ezen kvantumokhoz azonban már nemcsak meghatározott energiát, hanem impulzust, impulzusmomentumot, részecskeszámot is rendelhetünk. Kézenfekvő tehát a gondolat, hogy az elemi részek fizikáját ezen részecskék, ezen kvantumok segítségével írjuk le.

Rendkívül meglepő az a tény, hogy a fenti elképzelést kiegészítve két, szinte triviális feltétellel az elemi részek világának szinte minden jelensége nagy pontossággal leírható. Ezen két feltétel egyike az önellentmondás-mentes-

1. ábra. A víz vázlatos fázisdiagramja hőmérséklet (T) nyomás (p) síkon. Az egyes fázisvonalak azon p - T értékeket jelölik, ahol több fázis tud együtt létezni. Így például közöségi légköri nyomáson (1 atm) a víz és jég 0°C -on, a víz és gőz 100°C -on tud együtt létezni. A légköri nyomás felénél a víz és jég még mindig 0°C -on, míg a víz és gőz 82°C -on tud együtt létezni. A víz és gőz közötti fázisvonal végét egy kritikus pont jelöli. Ezen p - T értékeknél a fázisátmenet másodrendű. Ezen T és p értékek esetén a víz opálóssá válik, a korrelációs hosszak végtelenné válnak. A jelenséget kritikus opaleszcenciának hívjuk.





2. ábra. Az erősen kölcsönható anyag nyomása a hőmérséklet függvényében. A sávok az egyes közelítési rendek belső bizonytalanságát mutatják. A sötét vonal jelzi a rácseredményeket. Ahogy látható, a fokozatos közelítések módszere még arra sem képes, hogy megadja az ideális gáztól való eltérés előjelét.

ség (ezt minden végső elmélettől természetesen elvárjuk). A másik feltétel, hogy az elmélet alapegyenleteit bizonyos szimmetriatranszformációk változatlanul hagyják. A kvantum-elektrodinamikában ez a transzformáció az anyagtereknek egy egységnyi abszolút értékű komplex számmal való megszorozása. A gyenge kölcsönhatás esetében a szorzás 2×2 -es (speciális unitér) mátrixokkal, az erős kölcsönhatás esetében pedig 3×3 -as (ugyancsak speciális unitér) mátrixokkal történik. Szinte hihetetlen, hogy ezen egyszerű transzformációk a kölcsönhatásokat egyértelműen meghatározzák, és az eredmény teljes összhangban van a kísérletekkel. Ennek szinte emblemikus példája az elektron mágneses momentuma (annak a jellemzője, hogy egy elektront mágneses mezőbe téve, majd a mező irányától kissé eltérítve mekkora erőket billentik vissza). Lenyűgöző, hogy ezt a mennyiséget a kísérletek 12 tizedes jegyre meg tudják határozni. Az elméleti fizikus számára talán még lenyűgözőbb viszont az a tény, hogy a fenti egyszerű elvek alapján – és persze sok fáradságos számolás után – a kísérleti eredményekkel teljesen egyező elméleti jóslatot tudunk adni. Ezek a számolások a perturbációs számítás keretében történtek. Ezen eljárás a lényege az, hogy valamely kis paraméter szerint hatványsor szerűen haladva fokozatosan közelítjük az eredményt. Az elektron mágneses momentumának pontos elméleti jóslata így azzal a ténnyel magyarázható, hogy a számításban a kvantum-elektrodinamika csatolási állandója, a finomszerkezeti állandó, $1/137$ igen kicsi szám. Sajnos a perturbációs számítás, a fokozatos közelítések módszere, nem mindig alkalmazható. Ha a csatolási állandó nagy, akkor a perturbatív sortól nem várhatunk konvergenciát. Az erős kölcsönhatás, ahogy neve is mutatja, egy nagy csatolási állandót tartalmazó, erősen kölcsönható elmélet. A 2. ábra mutatja az erősen kölcsönható anyag nyomását a hőmérséklet függvényében (a nyomást szokás az irodalomban az ideális gáz nyomásával normálni). A vezető rendű eredmény mellett feltüntettük az azt követő 3 további rendet is. A sort a finomszerkezeti állandóhoz hasonló, erős csatolási állandó négyzetgyöke szerint rendezzük. A sávok az egyes közelítési rendek belső bi-

zonytalanságát mutatják. A sötét vonal jelzi a nem perturbatív, úgynevezett rácseredményeket. Ahogy látható, a fokozatos közelítések módszere még arra sem képes, hogy megadja az ideális gáztól való eltérés előjelét.

A probléma megoldása csak egy másik módszer, az rácstérelmélet segítségével lehetséges. A rácstérelmélet a teret és időt nem folytonos változókként kezeli, hanem egy ráccsal helyettesíti. (Hasonló rácsot használnak az időjárás-előjelzés során, amikor különböző földrajzi helyeken és magasságokban mérik a hőmérsékletet, szélirányt és a nyomást. Minden polgári repülőgép elvégzi repülés közben ezeket a méréseket, melyekből az adatok összesítése és persze jelentős számolások után végül az időjárás-előjelzések készülnek.) A részecskefizikában a rács rácspontjaiba az elmélet mezőerősségeit írjuk. Láttuk, hogy kvantumelméleteket egymással fel nem cserélhető operátorok segítségével írhatunk le. Létezik egy másik (Feynman Nobel-díjas amerikai kutató nevéhez fűződő) pályaintegrálos leírási mód, mely jobban illeszkedik a rácsformalizmushoz. A kvantummechanikai átmeneti amplitúdót úgy határozzuk meg, hogy minden létező klasszikus pályára összeadjuk az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat (i a képzetes egységgyök, S az adott klasszikus pályához tartozó hatás; érdemes megjegyezni, hogy klasszikus fizikában egy pálya létezik, és ezt a hatást minimalizálása választja ki). Igen egyszerű a fenti eljárást mezőelméletek kvantálására használni. Ebben az esetben minden létező mezőkonfigurációra adjuk össze az $\exp(iS)$ fázisfaktorokat. Mivel ezen fázisfaktorok igen erősen oszcillálnak, célszerű a számolásokat euklideszi téridőben elvégezni. Itt az idő formálisan a képzetes irányba halad, a fázisfaktorokból pedig $\exp(-S)$ alakú, a statisztikus fizikából jól ismert, Boltzmann-faktorok lesznek. Ezen Boltzmann-faktorok összegét euklideszi állapotösszegnek hívjuk.

Az egyes jelenségeket az állapotösszeg numerikus meghatározásával, nagy számítógépekkel számítjuk ki. Manapság 10 milliárd dimenziós integrálokat számolunk. Másodpercenként ezermilliárd műveletre van szükség, amely nyilván szuperszámítógépeknek való feladat.

Ilyen szuperszámítógép például a japán Earth Simulator, Földszámoló. Másodpercenként sok ezermilliárd műveletet végez, de sajnos az ára is dollármilliárd nagyságrendű. Magyarországon ez az út nem járható. Ezért az ELTE-n kifejlesztettünk egy szuperszámítógépet, mely a részecskefizikában versenyképes a japán géppel, de annak töredékébe kerül. Ez annak tudható be, hogy mi személyi számítógépekből építkezünk, és nem készen vesszük a szuperszámítógépet. A személyi számítógépek a számítási képességeikhez képest nagyon olcsók. Ez az óriási piac miatt van. A hétköznapi életben a számítógépipar egyik húzóereje a számítógépes játékok iránti igény. Az ezekben megjelenő forgatás csoportja matematikai értelemben nagyon hasonló (azzal lokálisan izomorf) a standard részecskefizikai elmélet egyik szimmetriatranszformációjához. Azaz, ameddig a személyi számítógépek gyártói arra törekednek, hogy a játékprogramok minél gyorsabban fussanak, és ennek megfelelően huzalozzák be a processzorokat, addig a részecskefizikai számítások is egyre gyorsabbak lesznek. Persze programozási szinten el kell menni a megfelelő szintig.

A számítástechnika másik húzóereje az internet. Ma már a gigabites hálózati kártya, gigabites hálózati kapcsoló standardnak számít. De nem kell feltétlenül switchen keresztül vinni az adatot. Ezért aztán feloszthatjuk a világegyetemet apró részekre, ezeket számoljuk egy-egy személyi számítógépen, és mindegyik részt összekötjük egy gigabites kábel által a szomszédjával. Ezt megtehetjük, hiszen a történések csak a közvetlen környezettől függenek. Az ELTE személyi számítógépekből készített egy szuperszámítógépet. 4 gigabites kártyát tettünk egy gépbe, és mint egy kockás papíron, összekötöttük a négy szomszédjával. Ilyen típusú számítógépek – melyet az irodalomban Budapest-rendszernek neveztek el – ma már a világ számos helyén működnek.

Térjünk vissza az erős kölcsönhatás elméletéhez, a kvantum-színdinamikához (QCD). Mint minden elméletet, ezt is a klasszikus Lagrange-függvénye révén célszerű megadni. A klasszikus Lagrange-függvény ismeretében a későbbiek során dől el, hogy egy elméletet klasszikus elméletként kezelünk, vagy operátoros, illetve pályaintegrálás módon kvantálunk-e.

A kvantum-színdinamikához nagyon hasonlít az elektrodinamika. Az elektrodinamikában az elektromos és mágneses mezőket, tereket (modern szóhasználattal a mértéktereket) az A vektorpotenciál, az elektron terét pedig egy ψ változó segítségével adjuk meg. A Lagrange-függvény a következő, jól ismert módon írható fel.

$$L = -\frac{1}{4g^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \left[i\gamma_\mu (\partial^\mu + iA^\mu) + m \right] \psi, \quad (1)$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu.$$

A fenti alakot a közismert mértékinvariancia lényegében egyértelműen meghatározza. Mértékinvariancia alatt azt értjük, hogy a Lagrange-függvény invariáns a mértéktranszformációkra. Egy mértéktranszformáció során a fermionteret egy helytől függő fázis tényezővel szorozzuk, a vektorpotenciálhoz pedig egy konstans szorzó erejéig a fázis argumentumának a négyesdivergenciáját adjuk. A Lagrange-függvény első tagja a mértéktag, mely ebben az egyszerű ábeli esetben négyzetes ($\bar{\psi} \gamma A \psi$). A második tag a fermiontag, melyben megjelenik a fermion-mértékbozon kölcsönhatás. A Dirac-mátrixokat γ_μ jelöli, míg a tömeget m .

Kézenfekvőnek tűnik a fenti Lagrange-függvény nem-ábeli általánosítása. Ezen általánosítás során az A tér ne egy valós szám legyen, hanem 2×2 (gyenge kölcsönhatás), 3×3 (erős kölcsönhatás) nulla átlósösszegű mátrix. Ez az általánosítás értelemszerűen azt is jelenti, hogy a fellépő $A\psi$ jellegű szorzatok miatt a ψ -nek a Dirac-indexen felül 2 vagy 3 úgynevezett „színindexe” is van.

$$L = -\frac{1}{4g^2} \text{tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \left[i\gamma_\mu (\partial^\mu + iA^\mu) + m \right] \psi, \quad (2)$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + i[A_\mu, A_\nu].$$

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

mező (A) önkölcsönhatásra képes, mely az utolsó tagban jelenik meg: $i[A_\mu, A_\nu]$. Az ábeli esetben a mértékterek valós számok, az ilyen kommutátor típusú tagok zérus értéket vesznek fel. Nem-ábeli esetben az A tereket mátrixokkal írjuk le, így a kommutátorok nemzérus értéket vesznek fel.

Ráctérelméleti számolásokhoz az A tereket a rács élein, fermionikus tereket a rács rácspontjain értelmezzük. Az állapotösszeg a következő alakot veszi fel.

$$Z(g) = \int \mathcal{D}A \exp(-S_g) \det M(A). \quad (3)$$

Az állapotösszegben a fent említett módon az összes létező mértékkonfigurációra összegzünk. Ezt az összegzést jelöltük formálisan $\int \mathcal{D}A$ -val. A statisztikus fizikából jól ismert Boltzmann-faktor az $\exp(-S_g)$ tag, ahol a Lagrange-függvény első tagja, a mértéktag adja S_g -t. g a Lagrange-függvényben is már szereplő csatolási állandó, mellyel a későbbiek során a hőmérsékletet (T) fogjuk változtatni; kis g magas, míg nagy g alacsony hőmérsékletet jelent (ennek az az oka, hogy a rács fizikai mérete a hőmérséklet reciprokával arányos, kis g kis rácscsillandót, így magas hőmérsékletet jelent). A g és T közötti egyértelmű kapcsolat miatt a továbbiakban a számunkra fontosabb T változót célszerű használni. A Lagrange-függvény második, fermionikus tagra vonatkozó összegzése analitikusan elvégezhető, és ez eredményezi $\det M(A)$ -t. $M(A)$ -t fermionmátrixnak nevezzük. Ez a mátrix a Lagrange-függvény második tagjának diszkretizálásából származó $N \times N$ mátrix, ahol N a rács pontjainak a száma. A mátrix elemei a Lagrange-függvényből leolvashatók. A $\bar{\psi}(x) m \psi(x)$ tag arra vezet, hogy a diagonális tagokban a tömeg, m jelenik meg, míg a derivált tag a szomszédos rácspontok között teremt kapcsolatot. A többi mátrixelem eltűnik. Ezek alapján látható, hogy a mátrix igen ritka, a diagonális és a diagonális melletti elemek kivételével minden elem zérus.

A ráctérelmélettel mint módszerrel számos eredménye ellenére volt egy megoldhatatlannak tűnő probléma. Képes volt vákuumban, zérus anyagsűrűség mellett választani a kérdéseinkre, de sajnos egészen a közelmúltig semmilyen eredményt nem kaptunk nemeltűnő anyagsűrűség mellett (a fizikusok által használt fontosabb név a véges barionsűrűség, barionoknak nevezzük például a protont és a neutron). Ennek oka az elméleti fizika számos területén fellépő úgynevezett előjelprobléma. Zérus anyagsűrűség esetén a fizikai mennyiségek kiszámításához szükséges állapotösszeg egyes tagjai mind pozitívak. Nem eltűnő anyagsűrűség mellett az állapotösszegben mind pozitív, mind negatív tagok megjelennek, melyek nagyrészt kölcsönösen kiejtik egymást. Ennél is súlyosabb a negatív előjellel összefüggő következő probléma. A ráctérelméletben fontossági mintavételt alkalmazunk. Ennek során, az egyes mezőkonfigurációk olyan valószínűséggel jelennek meg, mint amilyen nagy az állapotösszegben a járuléka. Ha azonban a járuléka negatív, akkor nem létezik hozzá tartozó valószínűség. Ez a probléma minden fontossági mintavételen alapuló eljárást lehetetlenné tesz. Ezért nem léteztek ráctérelméleti eredmények nem eltűnő anyagsűrűség mellett.

Az elmúlt években ezen a területen robbanásszerű változásnak lehettünk szemtanúi. Először az úgynevezett többparaméteres átsúlyozás eljárásával sikerült erre a fizikailag nagyon fontos kérdésre választ adni nem eltűnő anyagsűrűség mellett, majd számos új módszer is megjelent az irodalomban.

A nem eltűnő anyagsűrűséget fizikailag a jól ismert μ kémiai potenciál segítségével vezetjük be. Minél nagyobb μ , annál nagyobb az anyagsűrűség. A szokásos leírási mód a nagy kanonikus állapotösszeg. A Lagrange-függvény kiegészül a kémiai potenciál és az anyagsűrűség szorzatát tartalmazó taggal, majd elvégezzük a mértéktérre és a fermionikus terekre a szokásos összegzést. A már említett, fermionikus tagra vonatkozó analitikusan elvégezhető összegzés után megjelenő determináns így egy μ -tól függő tagot eredményez $\det M(A, \mu)$. Az állapotösszeg így a következő alakot veszi fel:

$$Z(T, \mu) = \int \mathcal{D}A \exp(-S_T) \det M(A, \mu). \quad (4)$$

A fizikai kérdések megválaszolása szempontjából rendkívül fontos az a tény, hogy $\det M(A, \mu=0)$ mindig pozitív valós szám, míg $\det M(A, \mu \neq 0)$ már nem az (a másik tag, $\exp(-S_T)$ mindig pozitív valós). Ez a lehetséges előjelváltozás vezet a már említett, híres előjelproblémára. Zérus kémiai potenciálnál, egy adott mértékkonfiguráció állapotösszegbeli járuléka $\exp(-S_T) \det M(A, \mu=0)$ pozitív valós szám, amelynek – adott normálási faktor bevezetésével – 0 és 1 közötti valószínűségi értelmezést adhatunk. Az állapotösszeg fontossági mintavételezésen alapuló kiszámítási módja, ezt a valószínűségi értelmezést használja ki, éppen ezzel a valószínűséggel veszi bele az adott mértékkonfigurációt a mintába. Az állapotösszeget néhány (általában ezer körüli), nagy súllyal szereplő, így a mintavételezés során nagy valószínűséggel megjelenő konfiguráció révén ki tudjuk számítani. Drámaian megváltozik a helyzet nem zérus kémiai potenciál esetében. Egy adott mértékkonfiguráció állapotösszegbeli járuléka $\exp(-S_T) \det M(A, \mu \neq 0)$ már nem pozitív valós szám, így 0 és 1 közötti valószínűségi értelmezést nem adhatunk neki. Ez egyben azt is jelenti, hogy a valószínűségen alapuló fontossági mintavételezésre nincs lehetőség. Ezen eljárás nélkül, az állapotösszeg közvetlen, minden egyes térkonfigurációt felölelő kiszámítása technikailag lehetetlen (az összeadandó tagok száma olyan nagy, hogy ha az Univerzum minden egyes atomja egy klasszikus számítógép lenne, amelyben fénysebességgel mozgó elektronok számolnának, akkor sem lenne elegendő a számítások elvégzéséhez a Világegyetem 15 milliárd éves teljes történelme).

A többparaméteres átsúlyozás módszere a következő módon alakítja át az állapotösszeget.

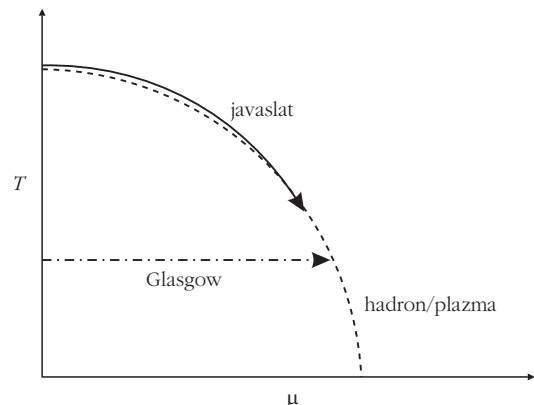
$$\begin{aligned} Z(T, \mu) &= \int \mathcal{D}A \exp(-S_T) \det M(A, \mu) = \\ &= \int \mathcal{D}A \exp(-S_{T_0}) \det M(A, \mu=0) \times \\ &\quad \times \left[\exp(-S_T + S_{T_0}) \frac{\det M(A, \mu)}{\det M(A, \mu=0)} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

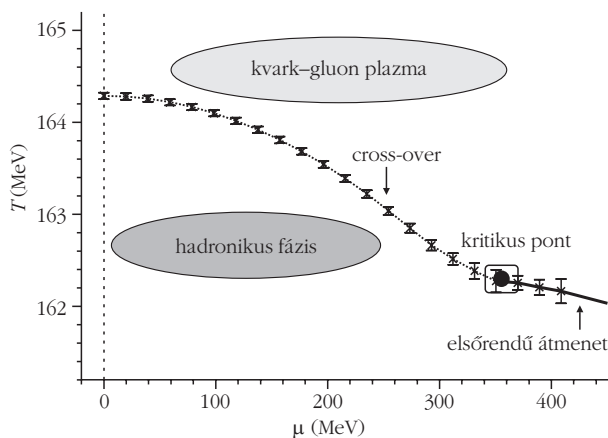
Ezen azonos átalakítás során bevezettük a T_0 segédhőmérsékletet. A fontossági mintavételezés T_0 hőmérsékleten és $\mu = 0$ kémiai potenciál mellett történik (a zérus kémiai potenciál nem vezet előjelproblémára). Ez az átalakított állapotösszeg első két tényezője. A kifejezés többi részét súlyként értelmezzük. Mivel ez a rész tartalmazza $\det M(A, \mu)$ -t, ezért a súly nem mindig pozitív. A fontossági mintavételezés problémája megoldódott, az elméletnek a váltakozó előjelekkel kapcsolatos tulajdonsága pedig áthelyeződött egy oszcilláló súlyokból álló összeg kiszámítására. Természetesen az eljárás működőképessége azon múlik, hogy a fenti módon bevezetett fontossági mintavételezés során ($T_0, \mu = 0$ paramétereknél) valóban a vizsgálni kívánt elmélet ($T, \mu \neq 0$ paramétereknél) fontos konfigurációi jelennek-e meg.

Az irodalomban korábban használt úgynevezett Glasgow-módszer mélyen a hadronikus fázisban gyűjtött térkonfigurációkat. Ezeket a fenti módon súlyokkal látta el, és így számította ki az állapotösszeget. Nyilvánvaló, hogy a T tengelyen gyűjtött térkonfigurációk fizikai tartalma teljesen más, mint a a fázishatár túloldalán lévő fázist jellemző konfigurációké, ezért nem is várható, hogy bármilyen információt szolgáltatassanak a másik fázisról. Ezért volt a Glasgow-módszer sikertelen. A többparaméteres átsúlyozás magában a T tengelyen megjelenő fázisátmeneti pontban gyűjt térkonfigurációkat. Mivel ezen konfigurációk sokasága vegyesen tartalmazza a két fázisra jellemző konfigurációkat, ezért kézenfekvőnek tűnik, hogy ezeket lássuk el a megfelelő súlyokkal. A fázishatár mentén átsúlyozva ki tudjuk elégíteni azt a fizikai elvárást, hogy a fázisátmenet során a két fázis együtt tudjon létezni. A két eljárás fizikai tartalmát a 3. ábra illusztrálja.

A fenti módszerrel lehetőség nyílt nemeltűnő kémiai potenciál esetén is az erős kölcsönhatás vizsgálatára. Az általunk vizsgálni kívánt fázisátmenet, matematikai értelemben egy szingularitás, valójában véges térfogaton soha nem jelenik meg, csak a végtelen térfogati határesetben. Célunk, az átmenet típusainak feltérképezése, a fázisdiagram megadása a T - μ síkon, csak a térfogattfüggés feltérképezésével valószínűsíthető meg. A fázisátmenetnek megfelelő szingularitást végtelen térfogati limeszben az állapotösszeg zérushelye jelzi (érdemes emlékeztetni arra a tényre, hogy a például a nyomást $\log Z$ segítségével ad-

3. ábra. A Glasgow-módszer és a többparaméteres átsúlyozás módszereinek illusztrálása.





4. ábra. Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramja a kémiai potenciál (μ) – hőmérséklet (T) síkon.

juk meg). Véges térfogaton is megjelennek ilyen zérushelyek – Lee–Yang-zérók –, igaz ezek nem fizikai, komplex hőmérsékletekhez tartoznak. Amennyiben végtelen térfogati limeszben a rendszer valódi fázisátmeneteken megy keresztül, akkor a Lee–Yang-zérók a térfogat növekedésekor ráhúzódnak a valós tengelyre. Amennyiben csak egy gyors, de analitikus átmenettel állunk szemben, akkor a Lee–Yang-zéróknak a végtelen térfogati limeszben is lesz nem eltűnő képzetes részük, az átmenet analitikus marad. A Lee–Yang-zérók képzetes részének vizsgálata így lehetővé teszi a szingularitásra vezető fázisátmenet és az analitikus átmenet megkülönböztetését.

A 4. ábra mutatja a végeredményt. Két fázist különböztetünk meg. Az alacsony hőmérsékletű fázist hadronikus fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a hadronok, kvarkokból és antikvarkokból álló kötött részecskék). A magas hőmérsékletű fázist kvark–gluon plazma fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a kvarkok és gluonok). A két állapot közötti átmenetet $\mu = 0$ esetén az irodalom részletesen tanulmányozta. Egészen a közelmúltig teljesen ismeretlen volt viszont az átmenet függése az anyagsűrűségtől, illetve az anyagsűrűség hangolására alkalmas kémiai potenciáltól. Ahogy a 4. ábrán láthatjuk, zérus és kis kémiai potenciál esetén a két fázis közötti átmenet egy gyors cross-over. Egy adott hőmérséklet (kb. 162 MeV) és kémiai potenciál (kb. 360 MeV) esetén a fázisátmenet másodrendű. A fázisdiagram ezen pontját hívjuk kritikus végpontnak. Ebben a pontban a kritikus opaleszcenciához hasonló jelenségek kísérleti megjelenését várjuk. Ennél is nagyobb kémiai potenciál, illetve kisebb hőmérséklet esetén a fázisátmenet elsőrendűvé válik.

A fázisdiagram kritikus pontjának tanulmányozása a németországi GSI (Darmstadt) kutatóintézetben épülő új részecskegyorsító egyik elsőleges célja.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az erős kölcsönhatás segítségével adhatunk arra a kérdésre választ, hogy mi történik bármilyen anyaggal, ha egyre jobban felmelegítjük, illetve egyre jobban összenyomjuk. Egy új rácstérelméleti módszer segítségével sikerült a fázisdiagram meghatározása, melynek kísérleti ellenőrzése a közeljövő feladata.

AMIT A CUNAMIKRÓL ÉS OKAIRÓL MA TUDUNK

Bárdossy György
ny. egyetemi tanár

A 2004. december 26-án bekövetkezett cunami óta rengeteg újságcikk, rádió- és tévéműsor látott napvilágot erről a természeti jelenségről és pusztító következményeiről. Sajnos számos téves és ellentmondásos értékelés is megjelent. Most, bő évvel e természeti katasztrófa után időszzerű objektív vizsgálat tárgyává tenni, hogy mi az, amit a cunamiról és ezek kiváltó okairól ma tudunk és mi az, amit nem. Ez tanulmányom célja. Értékelésben elsősorban az Egyesült Államok Földtani Szolgálatának (USGS), valamint a Nemzeti Óceán és Atmoszféra Adminisztráció (NOAA) jelentéseit, továbbá *Meskó Attila*, a Magyar Tudományos Akadémia főtitkára közelmúltban megjelent tanulmányát vettem alapul (*História* 2005. 8. szám), de felhasználtam minden, a szaksajtóban és az interneten elérhető szakmai információt is.

Tengeri hullámfajták

A cunami japán szó, a „cu” jelentése kikötő, a „nami” hullámot jelent. Az óceánokon és tengereken háromféle hullámot lehet megkülönböztetni. Leggyakoribb a szél

által keltett „normális” hullám, de az árapály jelensége is hullámot kelt. Végül maga a cunami is hullám, illetve hullámok sorozata. E három hullámfajta tulajdonságai alapvetően eltérnek egymástól.

A szél által keltett hullámok maximum 8–10 m mélyséig nyúlnak le, amplitúdójuk nem haladja meg a 20 métert, 100–500 méteres hullámhossz mellett 20–50 km/óra sebességgel terjednek.

Az árapályhullám 10–30 méter mélyre terjed, amplitúdója 2–10 méter, hullámhossza 1–2 km, terjedési sebessége 20–40 km/óra.

A fentiekől alapvetően eltér a cunami, hiszen az egész víztömeg mozdul meg, amplitúdója csupán 0,4–2 méter, hullámhossza viszont 100–300 km és terjedési sebessége 500–1000 km/óra.

Mind ezek az adatok a nyílt tengerre érvényesek. A partokhoz közeledve a szél által keltett hullámok feltorlódhatnak, átbuknak, és így érik el a partot. Egyes különösen erős szélviharok, például hurrikánok vihardagályt hoznak létre, amikor a hullámok mellett a tenger szintje is több méterrel megemelkedik. Ez történt 2005 augusztusában New Orleans térségében a Katrine hurrikán hatására.

Az *árapálybullámok* elsősorban tölcser alakú öblökben, a víztömeg fokozatos feltorlódása miatt érnek el a szokottnál nagyobb magasságot, például a Kanada keleti partján fekvő Fundy-öbölben (New Brunswick) a dagályhullám 14–16 m magasságot ér el.

A cunamikat, mivel itt az egész víztömeg megmozdul, sokan *tengerrengésnek* is nevezik. Kis amplitúdója miatt a cunamit a nyílt tengeren szabad szemmel nem is lehet észrevenni. Figyelemre méltó a cunamik nagy terjedési sebessége a nyílt tengeren. A partokhoz közeledve a cunami lefékeződik, és ennek következtében az egész víztömeg akár több tíz méter magasra torlódik fel. Különösen összeszűkülő öblökben érhet el nagy magasságot a cunami. A hatalmas víztömeg egyirányú mozgása miatt a cunamik hatása közismerten katasztrofális lehet. A cunamik a nyílt óceánon több ezer kilométerre is terjedhetnek, sőt diffrakció (hullámelhajlás) hatására kiszögellő partokat meg is kerülhetnek. Több esetben a cunami partra érkezése előtt a tenger „visszahúzódott”, azaz a vízszint 1–2 méterrel csökkent. Ilyenkor lapos partokon több száz méter széles sáv kerül szárazra. Ezt a jelenséget a cunamik nagy hullámhossza magyarázza.

Melyek e szembevetendő különbségek okai? A normális, szél által keltett hullámok esetében a szél erősségétől függ a hullámok mérete és sebessége. Az *árapálybullámok*at közismerten a Nap és a Hold gravitációs vonzása hozza létre. Jelenlegi ismereteink szerint *cunamik*at négyféle jelenség hozhat létre:

1. Tenger alatti földrengések.
2. Vulkanári szigeteken bekövetkező robbanásszerű vulkánai kitérések, amelyek következtében a vulkánai építmény összeomlik, és helyét tenger önti el.
3. Nagyméretű tengeralatti földcsuszamlások.
4. Különösen nagy meteorit vagy aszteroida becsapódása a tengerbe.

Tapasztalatok szerint a legtöbb cunamit tenger alatti földrengések hozzák létre. Ugyanakkor az is kiderült, hogy nem minden tenger alatti földrengés okoz cunamit. Úgy tűnik, ha a földrengés hatására a tengerfenék csak oldalirányban mozdul el, nem jön létre cunami. Ha viszont a földrengés alkalmával a tengerfenék több métert megemelkedik vagy lesüllyed, úgy kialakulhat a tengerrengés és ennek következtében a tengerparton a pusztító cunami.

Tenger alatti vulkánai kitérések is létrehozhatnak cunamikat. A tenger alatti földcsuszamlások szerepének mértéke még nem tisztázott. Valószínű, hogy ezeket is tenger alatti földrengések váltották ki.

Meteorit- vagy kisbolygó-becsapódások az emberi történelem folyamán bizonyítottan nem hoztak létre cunamikat, de földtani megfigyelések arra utalnak, hogy a földtörténet során ilyenekre többször is sor került. Amerikai szakértők számításai szerint egy 300 m átmérőjű aszteroida becsapódása a tengerbe 11 m magas cunamit keltene (Perkins, 2004). Az utóbbi évtizedek földtani kutatásai kiderítették, hogy a földtörténet során ismételten sor került nagyméretű aszteroidák becsapódására, például a triász és jura, valamint a kréta és harmadkor határán (Pálfi, 2000). Amennyiben a becsapódás tengerbe

történt, hatalmas – több száz méteres – cunamik jöhetnek létre. Ilyen földtörténeti korú cunamik egyértelmű bizonyítása azonban még a jövő kutatások feladata.

Az írott történelem legnagyobb cunamijai

– Kr. e. 1650 körül az Égei-tengeri Thera (más néven Szantorini) vulkánai szigete egy rendkívüli méretű kitérés során felrobbant. A nyomában létrejött cunami elpusztította a Therától mintegy 100 km-re délre fekvő Kréta szigetének északi partmenti városait, az ott kialakult minoszi kultúrát. A vizsgálatok szerint a cunami magassága közel száz métert érhetett el.

– 1755-ben tenger alatti földrengés hatására cunami érte el Lisszabon városát és közel 100 000 ember halálát okozta. A cunami érkezését a tenger visszahúzódása előzte meg. A cunami magasságát a korabeli megfigyelők 5–10 m-re becsülték.

– 1883-ban a Jáva közelében levő Krakatau (más néven Krakatoa) vulkánai sziget kitérés során felrobbant, a vulkánai építmény beomlott, ami cunamik egész sorát hozta létre. A legmagasabb 40 m-t ért el, és a közeli Jáva és Szumátra szigetén mintegy 36 000 ember életét oltotta ki. A cunamik a Hawaii-szigetek partjait is elérték, sőt Dél-Amerika nyugati partján is észlelték azokat. A sztratoszférába felkerült vulkánai hamu és por több éven át csökkentette a Föld felszínére jutó napsugárzás erősségét és körülbelül egy fokkal csökkentette az átlagos hőmérsékletet.

– 1896-ban egy Japán partjai előtt kipattant tenger alatti földrengés több mint 20 méter magas cunamit keltett. Az áldozatok száma meghaladta a 26 000-et.

– Rendkívüli figyelmet érdemel az 1958-ban Alaszkában a Lituya-öbölben egy földrengés és földcsuszamlás nyomán létrejött cunami. A terület lakatlan, tehát áldozatok nem voltak. Viszont az alapos földtani megfigyelések és vizsgálatok szerint a cunami magassága a 200 métert is elérhette. Ezt jelezte a parti növényzet pusztulása eddig a magasságig.

– 1960-ban Chile partjai közelében a tengerfenék alatt kipattant földrengés hatására létrejött cunami mintegy 6 000 ember halálát okozta. A cunami magassága meghaladta a 25 métert. Ezt a cunamit órákkal később Japánban is észlelték.

– 1998-ban Pápua Új-Guinea partjaitól 24 km-re kipattant földrengés hatására egy körülbelül 12 m magas cunami keletkezett, amely a parti területen körülbelül 2 200 ember halálát okozta. A feltűnő az, hogy a földrengés csak 7,1 magnitúdójú volt, ilyen magnitúdó mellett pedig nem szoktak nagyobb cunamik létrejönni. A szakemberek véleménye szerint a földrengés egy tenger alatti földcsuszamlást indított meg, és az hozta létre a cunamit. A csuszamlásban részt vett üledék mennyiségét körülbelül 4 köbkilométerre becsülik a szakértők.

– A 2004. december 26-án Szumátrától nyugatra létrejött cunami több mint 30 méter magasságot ért el, és közel 300 000 életet követelt. A halottak pontos számát nem lehetett megállapítani, mert a visszahúzódó hullám a tetemek ezreit sodorta a tengerbe. Kétségtelenül ez volt a



1. ábra. Szumátra szigetének északi végén, Banda Aceh helysége nál a 2004. december 26-i cunami elpusztította a partvonalat.

történelem legnagyobb emberáldozatot követelő cunami-ja, amely Szumátra szigetén kívül Thaiföld és Malajzia partjain, a Maldív-szigeteken, Sri Lankán és India délkeleti partjain is pusztított. A cunamit egy, a Szumátra északnyugati partjaitól körülbelül 160 km-re nyugatra, a tengerfenék alatt kipattant földrengés hozta létre. A cunami a földrengés kipattanása után 15 perccel érte el Szumátra partjait, Thaiföldet 60, Sri Lankát pedig 90 perc alatt. Szumátrán a hullám érkezését a tenger visszahúzdása előzte meg. Ahol a part lapos volt, a hullám 1–2 km-re hatolt be a szárazföldre (1. ábra).

A fenti legnagyobb cunamik mellett a huszadik század során még 140, emberi életet is követelő cunamit jegyeztek fel. Továbbá közel ezer olyan kisebb cunamit is megfigyeltek, amelyek nem okoztak károkat. A legtöbb a Csendes-óceán térségében jött létre. A tapasztalatok szerint a cunamik amplitúdója, hullámhossza és sebessége elsősorban a kiváltó földrengés paramétereitől függ. Általános szabály, hogy minél nagyobb az adott földrengés magnitúdója, annál nagyobb cunami keletkezik. A 7,0-nál kisebb magnitúdójú földrengések általában nem hoznak létre károkat okozó cunamikat.

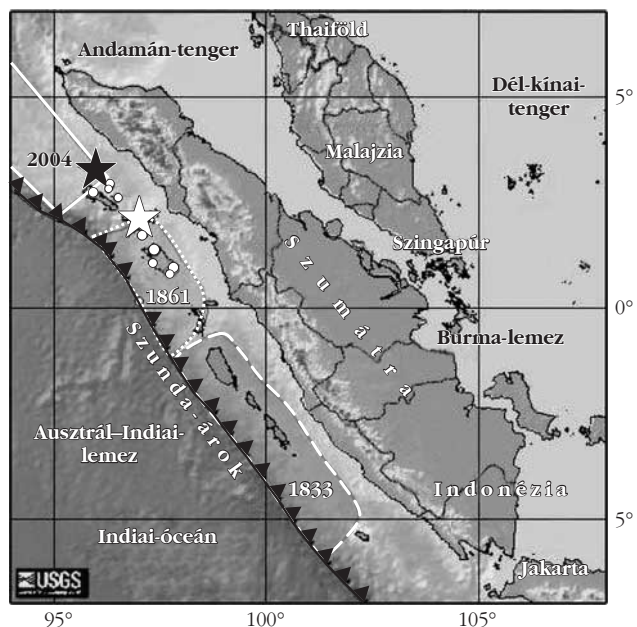
A kontinensvándorlás elméletét az olvasók nyilván ismerik, annyi szó volt már róla a sajtóban, a rádióban és a tévében. A legtöbb földrengés ott keletkezik, ahol az egyik litoszférelmez a másik alá bukik. Ezt a jelenséget nevezik *szubdukciónak*. Földrengésektől kísért szubdukció történik ma is az Indonéz-szigetív külső, délnyugati oldalán és Japán keleti partjai mentén. Ez az oka annak, hogy itt jött létre eddig a legtöbb cunami. A 2004. december 26-i cunamit egy rendkívüli erejű – 9,3 magnitúdójú – földrengés váltotta ki, melynek epicentruma körülbelül 30 km-rel a tengerfenék alatt helyezkedett el. A mérések szerint a földrengés során $2 \cdot 10^{18}$ joule energia szabadult fel. Az azóta elvégzett tengeri mérések szerint a tengerfenéken egy fő törésvonal mentén körülbelül 15–20 m-es oldalirányú elmozdulás történt, továbbá a tengerfenék körülbelül 5–10 m-rel megemelkedett. Ezt a nagy földrengést

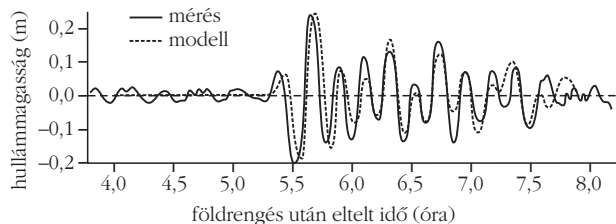
2005 áprilisáig számos gyengébb utóregés követte, amelyek nyomán azonban újabb cunamik nem keletkeztek. A főbb utóregések epicentrumai az elsőtől délkeletre helyezkedtek el (2. ábra). Az ábrán az USGS értelmezése szerinti szubdukciós övet is feltüntették, melynek hossza mintegy 1200 km. E mentén tolódik az Indiai-óceán litoszférelmeze az Indonéz-szigetív alá, mintegy 40–45 fokos szög alatt. Ebben az övben a szubdukció ma is folytatódik, tehát a jövőben is várhatók újabb földrengések, és cunami keletkezése sem zárható ki. Hogy mikor, azt ma nem tudjuk megmondani. A 2. ábrán Szumátra délnyugati oldalán húzódó hegyvonulat ma is működő vulkánok sora. Ezek a szubdukció során alábukó és fokozatosan megolvadó litoszférelmezből származnak. Könnyen illó vegyi komponenseik hatására tör fel a megolvadt kőzetanyag (láva) a felszínre. Ez a vulkáni ív Jáva szigetén is folytatódik. Szumátrán a vulkáni ívtől északkeletre zavartalan kőzetekből álló síkság következik.

A cunamik elleni védekezés

A cunamik kialakulását megakadályozni nem lehet, de katasztrófális következményeik miatt több érintett ország nagy erőfeszítést tesz a közelgő veszedelem jelzésére. Sajnos ma még azt sem lehet megmondani, hogy mikor pattanhat ki valahol cunami létrehozására képes földrengés. Az e téren erősen érintett Egyesült Államok, Japán, Kína és Oroszország óriási erőfeszítéseket tesznek a földrengések minél pontosabb előrejelzésére. Eddig azt sikerült meghatározni, hogy melyek a földrengésekkel leginkább veszélyeztetett területek. Nagy valószínűséggel meghatározható

2. ábra. A 2004. december 26-i cunami földtani–geofizikai értékelése a USGS szakemberei szerint. Jól láthatók Szumátra hegyei, mely aktív vulkáni öv, mögötte a zavartalan kontinentális kéreg. A Szunda-árok (fekete vonal háromszögekkel) a szubdukciós öv kezdete, mögötte a folytonos, a pontozott és a szaggatott fehér vonalak által határolt területek a szubdukciós nyírési övek, a fekete és fehér csillag a 2004-es és az 1863-as földrengés epicentrumai, a körök az utóregések helyét jelzik.





3. ábra. A számított és a ténylegesen mért cunamihullám amplitúdója a nyílt tengeren a földrengés kipattanásától számított órák függvényében (Rat Island cunami, 2003. november 17.)

a földrengések gyakorisága évtizedes időintervallumokon belül. Sajnos egy adott területen a földrengés pontos előrejelzése – beleértve a várható magnitúdót – eddig még nem sikerült.

Korábban főként gyenge előrengések regisztrálásával próbálták adott földrengés várható kipattanását meghatározni, de ez a metodika eddig nem vezetett sikerre. A legutóbbi években különböző elektromágneses jelenségekre terelődött a figyelem, melyek a földrengéseket néhány nappal vagy órával megelőzik. Így például igen rövid frekvenciájú (< 1 Hz) rádióhullámokat észleltek amerikai kutatók Kaliforniában néhány órával egy földrengés kipattanása előtt. Egy másik ígéretes módszer a készülő földrengés körzetében kibocsátott infravörös kisugárzás mérése műholdakról. A NASA mérései szerint a 2001. évi gujarati (India) földrengést néhány nappal megelőzően jelentősen felerősödött az infravörös kisugárzás, ott ahol a földrengés későbbi epicentruma elhelyezkedett. Mindez ma még kísérleti szakaszban van, de a szakemberek szerint megalapozott remény van arra, hogy egy-két évtizeden belül a földrengések előrejelzése érdemben pontosabbá válik (*IEEE Spectrum*, 2005. december).

Napjainkban a reális cél csak a már létrejött cunami minél gyorsabb és pontosabb jelzése, és az érintett lakosság riasztása. Ilyen irányú kutatások és fejlesztések elsősorban az Egyesült Államokban és Japánban folynak 1946 óta. Kiderült, hogy cunamik érkezését a tengerfenéken lehorgonyozott nyomásmérő készülékekkel lehet előre jelezni. Ezek nagy pontossággal mérik a vízoszlop nyomását. Földrengés során a nyomás megváltozik, és a változás mértékét a készülék egy felszíni bójához továbbítja. A készülékek még a cunami hullám átvonulásakor fellépő kis nyomásnövekedést is észlelni tudják, így a cunami előrehaladását a nyílt tengeren is követni lehet. A bójáról az információk műholdra kerülnek, onnan pedig az adott ország cunamiriasztó központjába. A riasztást rádióval és TV-n keresztül azonnal közléstesznek. 1965-re épült ki a PTWC-nek nevezett riasztó-rendszer (Pacific Tsunami Warning Center). Ehhez természetesen földrengésjelző szeizmológiai állomások is tartoznak. Japán partjai mentén jelenleg 80 víz alatti nyomásérzékelő állomás működik folyamatosan.

Az Egyesült Államokban a NOAA felelős a cunamiriasztásért. A NOAA irányításával 2003-ban egy olyan új, számítógéppel vezérelt riasztó-rendszert helyeztek üzembe, amely a szeizmométerekről kapott adatok alapján modellezi a cunami várható paramétereit (Real-Time Tsunami System). A rendszer jelenleg hat, az óceánfenéken elhelyezett szenzorból áll: három az Aleuti-szigetektől dél-

re, kettő az Egyesült Államok nyugati partjai előtt és egy félúton Chile és a Hawaii-szigetek között. A rendszert először 2003. november 16-án alkalmazták, amikor az Aleuti-szigetektől délre egy 7,5 magnitúdójú földrengés pattant ki. A 3. ábra a földrengés kipattanásától számított idő függvényében mutatja be a számított (szimulált) és a ténylegesen mért cunamiamplitúdókat. A két görbe egybeesése az új módszer eredményességét igazolta. A NOAA szakértői azt remélik, hogy ezzel a rendszerrel a korábbinál jóval gyorsabb és pontosabb előrejelzés, illetve riasztás érhető el. Ennek érdekében 2003-ban egy cunamiveszélyt csökkentő programot indítottak meg, melynek keretében számos új szenzort kívánnak a Csendes-óceán térségében elhelyezni. A rendszer általános alkalmazhatósága természetesen attól is függ, hogy mennyire tudják a számítógépes modellezés során az adott terület rész szeizmológiai és földtani adottságait figyelembe venni.

Az Indiai-óceán partvidékén a 2004. évi nagy cunami létrejöttkor cunamiriasztó-rendszer nem működött. Szakértők véleménye szerint megfelelő riasztó-rendszer működése esetén az áldozatok nagy részét nem lehetett volna menteni. Ezért most az Indiai-óceán körül a fenti-ekhez hasonló riasztó-rendszer kiépítését tervezik.

Japán cunamiknak leginkább kitett partjai mentén kőből és betonból védőgátakat is építettek a károk csökkentése érdekében. Ezek azonban csak kisebb cunamik esetében nyújtottak hatékony védelmet. Így például az Aonae kikötőben kiépített védőgáton az 1993-ban keletkezett cunami átcsapott és megrongálta a mögötte levő épületeket. A védőgát mégis hasznos, mert lelassítja az érkező víztömeget és csökkenti annak pusztító hatását.

Végül nem elhanyagolható védekezési módszer a cunamiknak kitett tengerpartokon élő lakosság felvilágosítása és oktatása. Ebbe tartozik a riasztás módjának ismertetése, az optimális menekülési útvonalak kijelölése és bemutatása, és a legveszélyeztetettebb helyeken építkezés betiltása vagy korlátozása. Az Egyesült Államokban úgynevezett *cunamikockázat-térképeket* szerkesztenek és bocsátanak a helyi önkormányzatok rendelkezésére. (A NOAA értékelése szerint az Egyesült Államokban körülbelül 3 millió ember él nagyobb cunamik által veszélyeztetett parti területeken.)

A földrengések keletkezésével, mérésével és geofizikai értékelésével a *szeizmológia* tudománya foglalkozik. Ezt a kérdéskört Meskó akadémikus fent említett cikke részletesen tárgyalja, ezért ennek megismétlését feleslegesnek tartom.

Összefoglalva, a földtörténet során rendszeresen létrejöttek cunamik és megjelenésükkel a jövőben is számolni kell. Megakadályozni nem tudjuk őket, de megfelelő riasztással pusztító következményeiket csökkenteni lehet.

Cunamikkal kapcsolatos információkat közlő és rendszeresen megújított internetes honlapok:

- <http://www.sciencenews.org/scripts/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- http://en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake
- <http://www.tsunami.noaa.gov/tsunami.story.html>
- <http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>
- <http://www.geophys.washington.edu/tsunami/general/physics/physics.html>
- http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/1/1f/USGS_Sunda_Trench.jpg

The great tragedy of science – the slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact.¹

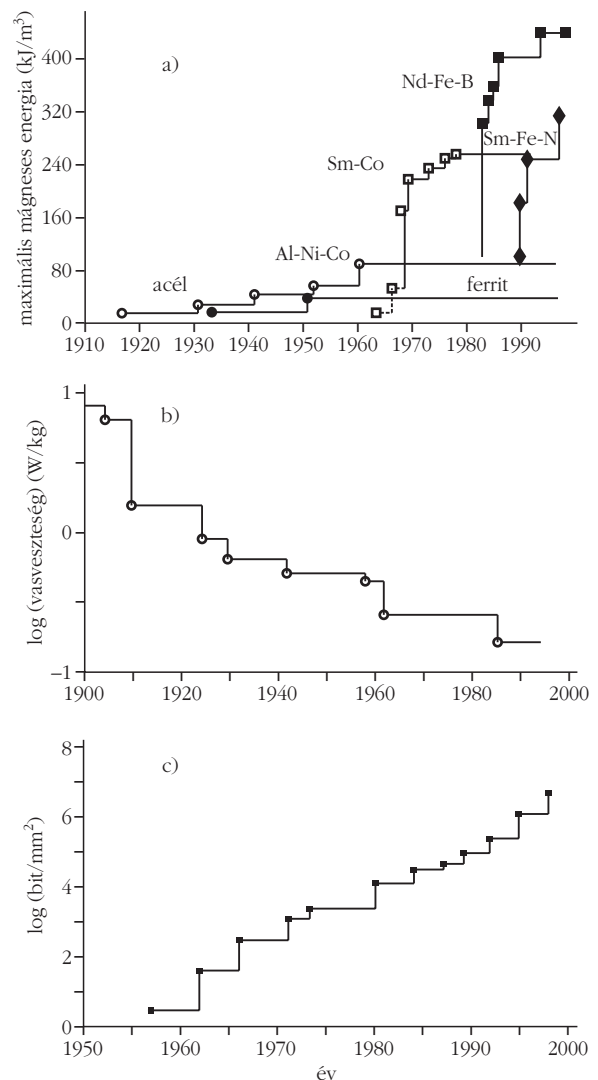
A múlt században használt ferromágneses anyagok paraméterei látványos fejlődést mutattak. A technológiailag fontos fő alkalmazási területek: permanens mágnesek, lágymágneses anyagok (elektromágneses gépek, transzformátorok) és mágneses adatrögzítés. Az állandó mágnesek technikai teljesítményét legjobban jellemző mennyiség a maximális mágneses energia (BH_{\max}), azaz ezeknél az anyagoknál nagy maradék indukció és koercitív erő kívánatos. Ez átlagosan 12 évente megduplázódott (1.a ábra), ami az ugyanakkora erősségű állandó mágnesek méretének arányos csökkenését jelentette. Lágymágneses felhasználások esetén minél kisebb koercitív erő és vasvesztés (ami a vasmag átmágnesezéséből és örvényáramokból származik) szükséges, utóbbi körülbelül 8 évente feleződött (1.b ábra). A leglátványosabb fejlődést a mágneses rögzítés területén láthattuk. 1960 óta a tárolási sűrűség mintegy kétszázszorosan megduplázódott meg (1.c ábra). Ebben jelentős szerepet játszott az óriás mágneses ellenállásváltozás jelenségének az olvasó/írófejekben történő alkalmazása mellett azok mechanikai és aerodinamikai fejlesztése is.

A figyelemre méltó fejlődést elsősorban egy másodlagos mágneses jellemző, a mágneses anizotropia igények szerinti változtatása eredményezte. Ezt részben az anyag mikroszerkezetének alakítása, részben új technológiák, anyagcsaládok felfedezése tette lehetővé. Az alkalmazott anyagok viszonylag szűk körén belül érdekes változások figyelhetők meg. A keménymágnesek anyagai kezdetben a fémes ötvözetek, majd a ferrimágneses oxidok, később a fémközi vegyületek, illetve ezek ötvözettel alkotott kompozitjai. A lágymágneses anyagokat kezdetől fogva az ötvözetek dominálták, és a fejlődés az amorf és nanokristályos ötvözetek felé haladt. Az információtárolás a mágneses oxidoktól ugyancsak a fémek, ötvözetek felhasználása felé tolódott el.

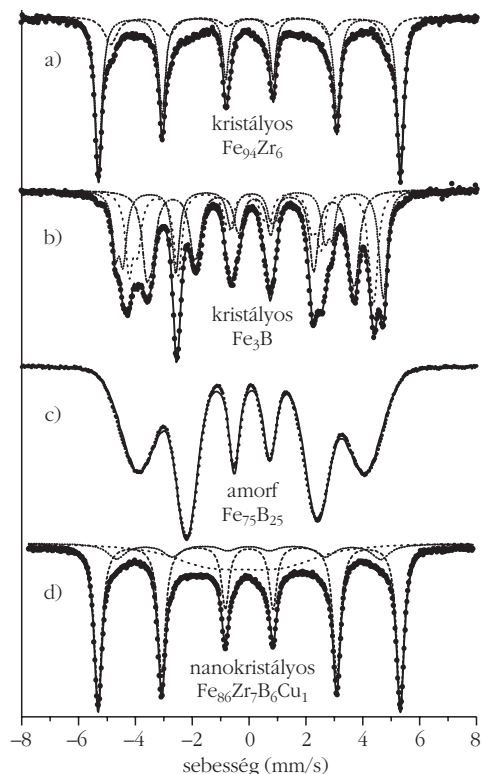
Valószínűleg a fémes ötvözetek dominanciája és a fémek mágnességének mindmáig nyitott elvi kérdései okozták, hogy elméleti ismereteink jelentős gyarapodása az említett látványos fejlődéshez kevéssel járult hozzá, inkább a határok felismerésében jeleskedett. Az alapvető mágneses jellemzőkre (mágneses momentum, Curie-hőmérséklet) vonatkozó számítások pontossága egyszerű rendszerek esetén sokat javult, de még messze van attól, hogy az egyre bonyolultabb szerkezetű, többkomponensű rendszereknek a félvezető-technológiában megszokott szintű tervezését lehetővé tenné. Emiatt a mai napig fontos az empirikus ismereteken alapuló fenomenológia, az „ökölszabályok” felismerése.

A fenomenologikus modellek használata óvatosságot igényel, könnyen lehet nagyot tévedni. Jó példa erre a kétkomponensű ferromágneses $3d$ -ötvözetek átlagmágnesszettségét rendszerező Slater–Pauling-görbe (1937, 1938), melynek alapötletét még a hetvenes-nyolcvanas években is használták a többkomponensű fémközi vegyületek és az átmenetifém–metalloid amorf ötvözetek mágnesszettségének „magyarázatára”. A görbe azon a megfigyelésen alapul, hogy a külső ($3d+4s$) elektronok számának függvényében a különböző ötvözetek mágnesszettsége igen hasonló érték, ebből kiindulva azt gondolhatnánk, hogy a külső elektronok koncentrációja jó paraméter a mágneses momentumok ötvözetekbeli viselkedésének leírására. Ennek magyarázatára feltételezték, hogy a kiterjedt elekt-

1. ábra. A maximális mágneses energia keménymágnesekben (a), a vasvesztés lágymágnesekben (b) és az információtárolás sűrűsége (c) a múlt században.



¹ A tudomány nagy tragédiája – a csodálatos hipotézisek ronda tényekkel való romba döntése. – T.H. Huxley (1825-1895), angol zoológus és fiziológus, aki *Darwint* megelőzve kimutatta az ember és az emberszabású majmok származási rokonságát.



2. ábra. Tipikus szobahőmérsékletű ^{57}Fe Mössbauer-spektrumok. A rendszerek a következők: gyorsított kristályos Zr-ban híg Fe–Zr (a), kristályos Fe_3B fémközi vegyület (b), amorf $\text{Fe}_{75}\text{B}_{25}$ ötvözet (c) és nanokristályos $\text{Fe}_{86}\text{Zr}_7\text{B}_6\text{Cu}_1$ ötvözet (d).

ron állapotok leírhatók egy olyan közös $3d$ sávval, amelybe mindkét komponens beadja a külső elektronjait. Ezt a sávot merevnek – azaz alakját változatlanak, az ötvözőktől függetlennek – tekintették. Amikor a mágneselesen felhasadt sáv egyik alsávja (spin-fel) megtelt (pl. Ni), akkor a modellnek megfelelően elvárt átlagmágnesezettség változása, $d\bar{\mu}/dc$ egyszerűen adódik a külső elektronok számának (azaz a rendszám) a változásából, így például Ni-hez adott Co, Fe vagy Cu esetén $d\bar{\mu}/dc$ várt értéke rendre +1, +2 és $-1 \mu_B$, a kísérleti értékekkel mintegy 10%-on belüli egyezésben. Ebben a széles körben elterjedt modellben az ötvözetek alkotó komponensei mintegy elvesztik atomi identitásukat, kiátlagolódnak, folytonos változásokat várunk, az ötvözetben előforduló lokális atomi környezetek nem játszanak semmilyen szerepet.

Ezért keltett megdöbbenést 1965-ben Jaccarino és Walker ^{59}Co magmágnesezes rezonancia mérése, amely azt mutatta, hogy a mágnesezes momentum kialakulását nem a komponensek átlagos tulajdonságai, hanem az atom közvetlen lokális környezete határozza meg. A kobaltatom nemmágnesezes szennyezés a Rh-fémekben, de Pd hozzáadására mágnesezzé válik. Jellegzetesen különböző rezonanciajel figyelhető meg a mágnesezes, illetve nemmágnesezes Co-atomokra. Növekvő Pd-koncentráció esetén az 1% Co-tal adalékolt $\text{Rh}_{1-c}\text{Pd}_c$ ötvözetben Jaccarino és Walker nem azt találta, hogy a mágnesezes momentum fokozatosan jön létre valamennyi Co-szennyezésen, hanem kétfajta Co-atomot figyeltek meg: egyes Co-atomokat a teljes kialakuló mágnesezes momentum jellemezte, míg a többi Co-atom nemmágnesezes maradt. A Pd-koncentráció növe-

lésére a teljes mágnesezes momentumú Co-atomok száma nőtt, ahelyett, hogy a korábbi elvárás szerint az egyes atomokon levő mágnesezes momentum nagysága fokozatosan növekedett volna. Ezek a megfigyelések azt mutatták, hogy a kobaltatomokon a Rh–Pd ötvözetekben csak akkor képződik mágnesezes momentum, ha két vagy több Pd-atom található a szomszédos rácshelyeken.

Rendezetlen ötvözetekben a lokális környezettől függő mágnesezes momentumok értékének meghatározása nem könnyű feladat, mivel a mágnesezettségmérések csak azok átlagértékét adják meg. A költséges direkt neutronszórásos mérés is jelentős kísérleti nehézségekkel jár még rendezett ötvözetek esetében is, ha az alrácson belül rendezetlenség található. Ezért fontosak a magfizikai jellegű módszerek, mint a már említett magmágnesezes rezonancia, perturbált szögkorreláció és vastartalmú anyagok esetén a Mössbauer-spektroszkópia. Ezek a magnívóknak az atom mágnesezes momentumja által okozott Zeeman-felhasadását – ami megfelel egy dipólus mágnesezes térben való energiaszintjeinek, és e teret szokásos hiperfinom térnek nevezni – mérik. A különböző lokális környezetű atomok hiperfinom tere különböző, és ez különálló spektrumvonalak megjelenéséhez vezethet, mint az a 2.a ábrán látható. Az ábrán az olvadékból gyorsított kristályos, tércentrált köbös (tck) híg Fe–Zr ötvözet ^{57}Fe -magon mért Mössbauer-spektruma található, ahol jól megkülönböztethető két, a $3/2 \rightarrow 1/2$ magspinnek megfelelő hatvonalas felhasadást mutató komponens. A kisebb intenzitású szatellit (a fővonal melletti komponens) az oldott Zr-atomok első- és második-szomszédjainak feleltethető meg, míg a fővonal a Zr-tól távolabbi vasatomok járuléka. A komponensek intenzitásarányából megállapítható, hogy a gyorsított eredményeként mintegy 3 at. %-nyi Zr oldódott a vasban, amelyben egyensúlyi körülmények között a cirkónium nem oldható. A 2.b ábrán Fe_3B fémközi vegyület Mössbauer-spektruma látható, ahol jól megkülönböztethető három egyenlő intenzitású hatvonalas komponens, amelyek a tércentrált tetragonális kristályos szerkezetben egyenlő számban előforduló 2, 3 és 4 B-szomszéd-ságú vasatomoknak tulajdoníthatók. Nyilvánvaló, hogy a különböző környezetű vasatomok mágnesezes momentumuk különböző.

A hiperfinom tér az atomi mágnesezes momentum indirekt mértéke. Egyszerű arányosságuk csak szigetelőekben (ahol ez kevésbé informatív, a Fe^{2+} és Fe^{3+} ionokra korlátozott) és kristályos valamint amorf fémközi vegyületekben (3. ábra) figyelhető meg. Ezekben az esetekben az a meghatározó, hogy a vasatomok első szomszédai sp -elemek (oxigén vagy metalloid), amelyek leárnyékolják a második vagy távolabbi szomszéd vasatomok kiterjedt elektronállapotainak járulékat. Ennek nagysága 10% alatt marad még a fém fémközi vegyületekben is. Ötvözetekben a hiperfinom tér mágnesezes szomszédoktól származó járuléka nagyobb, részben a közvetlen, elsőszomszéd mágnesezes atomok, részben az s -jellegű vezetési elektronok jelenléte miatt. Ennek következtében nem áll fenn egyszerű arányosság a vasatomok hiperfinom tere és mágnesezes momentumuk között. Ezekben az esetekben széles körben elterjedt a vasatomok H_{Fe} átlagos hiperfinom tere, $\bar{\mu}_{\text{Fe}}$ átlagos mágnesezes momentumuk és az ötvö-

zet $\bar{\mu}$ átlagmágnesezettsége közötti alábbi egyszerű empirikus összefüggés használata:

$$\bar{H}_{Fe} = a\bar{\mu}_{Fe} + b\bar{\mu}, \quad (1)$$

ahol a és b empirikus állandók, de csak egyikük független, mert összegük meghatározott a tiszta vas esetén mért értékkel ($15 \text{ T}/\mu_B$). Itt a második tag felel meg a közeli és távolabbi mágneses szomszédok által keltett járuléknak, míg az első tag a vasatomok saját mágneses momentuma okozta járulék. Megmutatható, hogy az (1) összefüggés a szennyezések keltette mágnesesmomentum- és hiperfinomtér-perturbáció lineáris összefüggésének feltevésén és a szennyező atomok véletlenszerű eloszlásán alapul. Az együtthatók az atomi szerkezet függvényei, de az egyes kristályszerkezeteken belül állandóknak tekinthetők. A korábban mondottak óvatosságra intenek az empirikus összefüggésekből nyerhető információk értékelésekor. Az (1) összefüggés érvényességének direkt kísérleti ellenőrzése nem oldható meg könnyen, mert hiányoznak a megfelelő pontosságú közvetlen neutrontdiffrakciós $\bar{\mu}_{Fe}$ adatok ($\bar{\mu}_{Fe}$ -t éppen a hiperfinomtér-adatokból ezen összefüggés segítségével szeretnénk meghatározni). Híg $3d$ szennyezést tartalmazó vasalapú ötvözetekben azonban lehetséges (1) segítségével olyan *paramétermentes* összefüggés levezetése, amelyben csak hiperfinomtér-adatok és az átlagmágnesezettség változása szerepel. Ehhez csupán az átlagmágnesezettség

$$\bar{\mu} = (1 - c)\bar{\mu}_{Fe} + c\mu_i$$

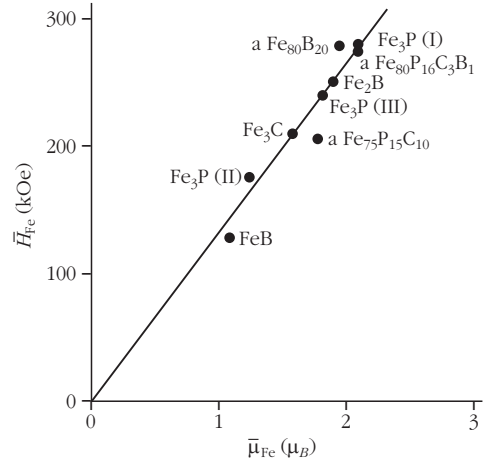
definícióját (ahol c a szennyező atomok koncentrációja, μ_i pedig a szennyező atomok mágneses momentuma) és a szennyező atomok hiperfinom terére (1) alapján felírt

$$H_i = a\mu_i + b\bar{\mu}$$

összefüggést kell felhasználni, híg ötvözet határesetben (azaz $c \rightarrow 0$). A kapott összefüggés

$$\frac{d\bar{H}_{Fe}}{dc} + (H_i - H_{Fe}) = \left(\frac{H}{\mu} \right)_{\text{iszta Fe}} \frac{d\bar{\mu}}{dc} \quad (2)$$

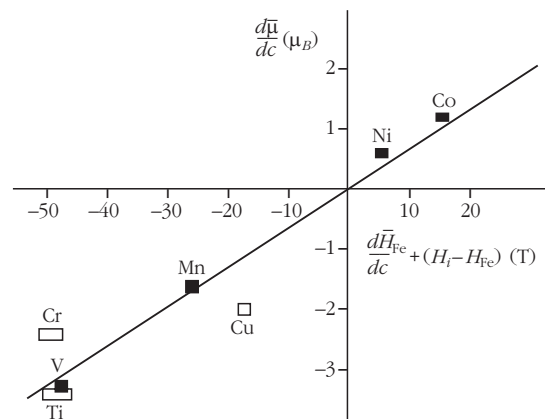
alakú, és mint az a 4. ábrán látható a kísérleti adatok meglehetősen jól követik az egyenlet által definiált szabad paraméter nélküli egyenest – $(H/\mu)_{\text{iszta Fe}}$ kísérleti értéke $15 \text{ T}/\mu_B$. A (2) összefüggés prediktivitását jól illusztrálja, hogy a közlése (1973) után ismertté vált kísérleti (Ti- és Cr-szennyezés hiperfinom terére és a Cu-szennyezések okozta átlagmágnesezettség-változásra vonatkozó) adatok ugyancsak elfogadható egyezést mutattak vele. Az összehasonlítást azért kellett a $3d$ -szennyezésekre korlátoznunk, mert elhanyagoltuk az atomi hiperfinom csatolási állandó rendszámfüggését, ami jó közelítés erre a sorozatra, de a vasétól lényegesen eltérő olyan szennyezések esetén, amelyek s -elektron száma eltérő. A 4. ábra igazolja az (1)-es empirikus formula érvényességét vasalapú tércentrálalt köbös ötvözetekre. Együtthatói (melyek közül csak egy független) meghatározhatók az egyszerű nemmágnesezettség okozta hiperfinomtér-csökkenés-

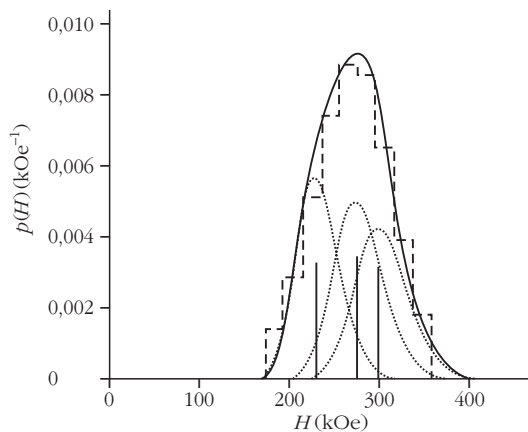


3. ábra. Vasatomok átlagos hiperfinom tere a vasatomok átlagmomentumának függvényében különböző kristályos és amorf (a) fémközi vegyületben. A kristályos tetragonális szerkezetű Fe_3P -ban az egyes (2, 3 és 4 P elsőszomszedságú) helyek egyedi hiperfinom tér és neutrontdiffrakcióval meghatározott mágneses momentum értékei szerepelnek.

ből (ilyenek pl. az Al és Si, melyek nem perturbálják a vasatomok mágneses momentumát), vagy a nemmágnesezettség $3d$ -szennyezés (Cu) helyén mérhető hiperfinom teréből. Mindkét módszer jó közelítéssel azonos eredményt ad: $a \approx 7 \text{ T}/\mu_B$, $b \approx 8 \text{ T}/\mu_B$, azaz a *tck* vasalapú ötvözetekben a vas hiperfinom terének saját mágneses momentummal arányos törzspolarizációs járuléka mintegy fele a szigetelőkben vagy fémközi vegyületekben talált értéknek. A fenti eredmények alapján nagyszámú ötvözetben és fémközi vegyületben meghatározásra került a komponensek mágneses momentumának koncentrációfüggése. Ezek közül különösen érdekes, hogy a *tck* Fe–Al ötvözetekben a vasatomok mágneses momentuma változatlan marad 3 Al elsőszomszédig (ez az egyszerű hígítás), körülbelül 20%-ot csökken 4 Al elsőszomszéd esetén, ennél több Al-szomszéd hatására pedig teljesen eltűnik. Más esetekben is megfigyelhető az Al szennyezők anomális hatása a $3d$ -komponensek mágneses momentumaira, például *tck* Fe–Ni ötvözetekben kevés Al hozzáadására a Fe momentumai változatlanok maradnak, míg a Ni nemmágnesezettség lesz, a híg kétkomponensű ötvözetek viselkedéséhez hasonló

4. ábra. Híg vasalapú ötvözetekben oldott $3d$ -szennyezések okozta átlagmágnesezettség-változás a hiperfinomtér-perturbáció függvényében. Az arányosságnak megfelelő egyenes meredekségét a tiszta vas paraméterei egyértelműen meghatározták. Az üres szimbólumok a (2)-es összefüggés közlése után meghatározott értékek.





5. ábra. A hisztogram az amorf $\text{Fe}_{75}\text{B}_{25}$ ötvözet vas hiperfinom terének eloszlása. A függőleges vonalak a kristályos metastabil Fe_3B fémközi vegyületben talált vas (növekvő sorrendben 4, 3 és 2 B elsőszomszédú) környezeteinek megfelelő hiperfinom terek, amelyek 10%-os kiszélesítésének megfelelő (pontozott) eloszlások összege a folytonos, a mért eloszlást jól leíró görbe.

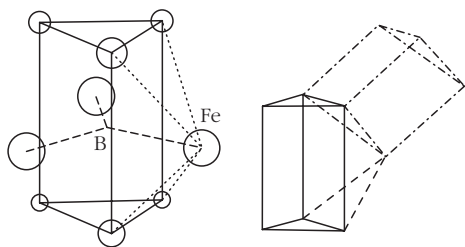
módon. Az (1) összefüggés alkalmazhatóságának fő korlátja az ötvözetek rendeződési hajlama, rövid távú rend kialakulása. Ez figyelhető meg például *tck* Fe–Co és Fe–Ni ötvözetekben. Gyakori tévedés ötvözetek esetén a hiperfinom tér és a mágneses momentum egyszerű arányosságának használata, de a fordítottja is előfordult, amikor a fémüvegek (amorf fémötvözetek) lokális szerkezetének leírására a mágneses szomszédoktól származó jelentős nagyságú járulékot tételeztek fel.

Az olvadákból történő gyorshűtés technikája a hetvenes évek második felére érte el azt a szintet, hogy rutinszerűen lehetett amorf ötvözeteket előállítani. Intézetünk *Hargitai Csaba* javaslatára alapján korán bekapcsolódott a kutatásokba. A periodikus kristályos szerkezet hiánya és az addig egy fázisban elő nem állítható összetételű ötvözetek megjelenése, nem utolsósorban pedig a technikai felhasználóság jelentős érdeklődést váltottak ki. Az átmenetifém–metalloid fémüvegek elsősorban mint igen jó lágymágneses anyagok kerültek előtérbe, és komolyan felmerült például a transzformátorokban használt Fe–Si lemezek kiváltásának lehetősége. Az amorf szerkezetben nincsenek a doménfal mozgását blokkoló, a kristályos szerkezetben jelenlevő hibahelyek, és a periodikus atomi szerkezet hiánya miatt nagy az elektromos ellenállás, amely az átmágnesezési veszteséget csökkenti. A fémüvegek atomi szerkezetének megértése, leírása komoly kihívást jelentett, mert a periodikusság hiánya miatt a diffrakciós módszerek csak a gömbszimmetrikus átlagot, a páreloszlást tudták meghatározni. Ennek következtében felértékelődtek és döntő fontosságúvá váltak a lokális atomi környezetre érzékeny Mössbauer-spektroszkópia által kapható információk. Az amorf Fe–B ötvözetek voltak talán a legrészletesebben vizsgált fémüvegek, egyszerűségüknek és széles koncentrációtartományuknak (11–40 at. %) köszönhetően. Tipikus Mössbauer-spektrum látható a *2.c ábrán*, amelynek vonalai strukturálatlanok és jelentősen kiszélesedtek a rendezetlen környezetek következtében. A Mössbauer-spektrumokból csak a vasatomok hiperfinom terének eloszlása határozható meg, amely természetesen egy ugyancsak széles, Gauss-eloszlás jellegű görbe, némi aszimmetriával (*5. ábr*

ra). Annak meghatározása, hogy az eloszlás milyen lokális környezetekhez tartozik, nem volt triviális feladat. Az nyilvánvaló volt, hogy az ebben a koncentrációtartományban létező egyetlen stabil kristályos fémközi vegyület, a Fe_3B atomi szerkezete és hiperfinom paraméterei semmilyen hasonlóságot nem mutatnak a fémüvegekével, hiszen a Fe_3B -ban csak egyfajta vas környezet található, amelyben 4 B első és 10 Fe másodsomszéd van. Az előállítás körülményei, a fémes jelleg és az, hogy szerkezetileg eltértek az ismert kristályos ötvözetektől, az átmenetifém-atomok szerepének túlértékelésére vezettek a szerkezet kialakításában. A kezdeti modellek szerint az amorf szerkezet az átmenetifém-atomoknak megfelelő gömbök véletlenszerű pakolásával írható le. A metalloid atomok az így kialakított váz üregeibe kerültek, szerepük az amorf szerkezet kialakításában elhanyagolható volt. Rövid távú rend létezése a fématomok irányítatlan kötése miatt fel sem merült. A vas lokális környezeteire jellemző hiperfinom tér eloszlása leírható volt ebben a modellben két szabad paraméter segítségével (ezek az eloszlás átlaga és szélessége, ami strukturálatlan eloszlás esetében nem túl informatív). A leírás azonban belső ellentmondást tartalmazott, mert a *3. ábrán* bemutatottakkal szemben a hiperfinom tér szomszédok keltette transzfer járulékára tízszer nagyobb értéket kellett feltételezni.

A fenti kép alapvetően megváltozott *Kemény Tamás* kollégámmal végzett vizsgálataink után. A Fe–B fémüvegek kristályosodásának részletes tanulmányozása a 25 at. % B összetételű amorf ötvözet kitüntetett szerepére utalt: ez volt az az összetétel, ahol a fémüveg egy fázisban kristályosodott, illetve amikor a kristályosodás két lépcsőben, először α -Fe kiválásával zajlott, ez volt a visszamaradó amorf anyag összetétele. Az egyfázisú kristályosodás eredménye egy addig ismeretlen, tetragonális szerkezetű fémközi vegyület volt, melynek Mössbauer-spektruma a *2.b ábrán* látható. A Fe_3B metastabil, magasabb hőmérsékleten a stabil *tck* vasra és Fe_2B -ra bomlik. Ebben a fémközi vegyületben a vasatomok átlagos hiperfinom tere megegyezik az azonos összetételű fémüvegével, ami hasonló átlagos B-koordinációt jelent. A Fe_3B -ban előforduló egyenlő számú Fe–B környezetek (2, 3 és 4 B-szomszéd) hiperfinom tere és eloszlása is nagyon hasonló (*5. ábra*). Ennél az összetételnél az alapvető különbség a kristályos és amorf állapot között az atomok közötti távolságok eloszlásában van: a kristályban ezek rögzített értékek, míg a fémüvegben fluktuálnak. Az atomi távolságok fluktuációjának nagysága diffrakciós módszerekkel megbecsülhető a radiális eloszlásfüggvény elsőszomszéd-csúcsának kiszélesedéséből. A fluktuáló Fe–B távolságok a vas mágneses momentumainak eloszlását eredményezik, amelynek szélessége megbecsülhető, ha a távolságfluktuációt a hiperfinom tér nyomásfüggése segítségével momentumfluktuációvá konvertáljuk. A kísérletileg meghatározott értékekből a hiperfinom térnek a távolságfluktuáció okozta fluktuációja 10%-osnak adódik, amelynek figyelembevételével az amorf ötvözet hiperfinomtér- (azaz közvetlen B-szomszéd-) eloszlása egyértelműen leírható (*5. ábra*).

Az amorf ötvözet atomi szerkezete legkönnyebben a metalloid környezetekkel tehető szemléletessé. Fe_3B -ban ez trigonális prizma: a központi B-atomot 6 közelebbi és 3



6. ábra. A kristályos Fe_3B szerkezet meghatározó szerkezeti eleme, a trigonális prizma sematikus rajza. A központi B-atomot 6 közelebbi és 3 távolabbi Fe-atom veszi körül. Az amorf szerkezet ilyen trigonális prizma pakolásaként képzelhető el.

távolabbi vasatom veszi körül (6. ábra). Az amorf ötvözet szerkezetét ilyen kissé fluktuáló atomi távolságú trigonális prizma kristályostól eltérő pakolású konglomerátumaként lehet elképzelni. Kutatásaink eredményeként a metalloid korábbi alárendelt szerepéből – amikor a fémváz üregeibe bújatták – főszereplővé lépett elő: maga alakítja ki a számára legkedvezőbb átmenetifém-ketrecet és ezáltal az amorf szerkezetet. Ennek eredményeként a fémüvegeket, mint nemsztöchiometrikus, némileg rendezetlen szerkezetű fémközi vegyületeket képzelhetjük el. Következésképpen, hogy azonos összetételű amorf és kristályos anyag dominánsan elsőszomszéd-koordinációtól függő tulajdonságaiban nem várunk és nem találunk a távolság-fluktuációnak tulajdonítható jelentős eltérést (pl. az amorf $\text{Fe}_{75}\text{B}_{25}$ és kristályos Fe_3B mágneses momentuma azonos, mindkettő ferromágneses, utóbbi Curie-hőmérséklete 50 K-nel magasabb). Gyakran elkövetett tévedés az irodalomban az amorf szerkezet (vagyis az atomi távolság fluktuációja) számlájára írni a kémiai rendezetlenségből, összetétel-különbségből adódó, időnként látványos eltéréseket a szűk összetétel-tartományban előállítható fémközi vegyületek tulajdonságaitól. A hosszú távú rend hiánya miatt természetesen nagy eltérések találhatók azokban a jelenségekben, melyeket az atomok periodikus elrendeződése alapvetően befolyásol (pl. elektrontranszport). Receptet adtunk az amorf szerkezet építőegységeinek meghatározására: kristályosodási folyamat vizsgálata, egy lépéses átalakulás keresése, metastabil kristályos fázis szerkezetének kiderítése. Ez például a Zr-többletes amorf Zr-Fe ötvözetek esetén a Fe-B fémüvegekhez hasonló eredményre vezetett: itt a méretkülönbségnek megfelelően a Fe hozta létre a metastabil kristályos Zr_3Fe szerkezetből felismerhető trigonális prizmat.

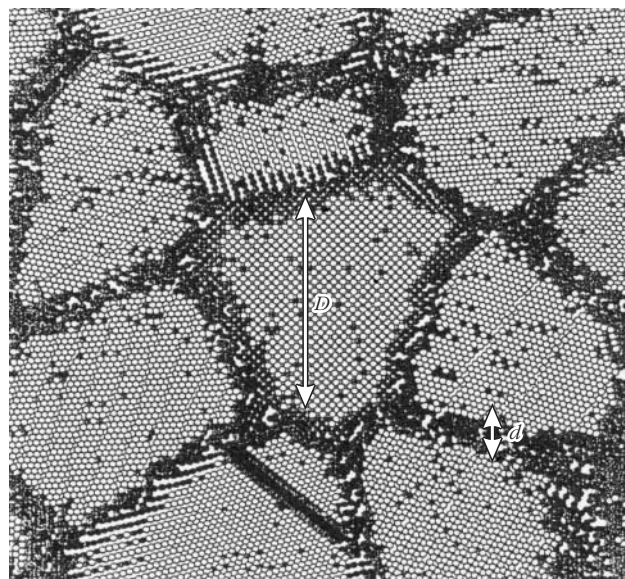
A kiterjedt kutatások ellenére az átmenetifém-metalloid fémüvegek alacsonyabb telítési mágneszettségük miatt nem váltották le a Fe-Si transzformátorlemezeket, miután az utóbbiak paramétereit tovább javították, hangfrekvenciás alkalmazásokban viszont változatlanul jelen vannak a fémüveg szalagok. A különböző szennyezők (pl. ritkaföldfémek) hatásának tanulmányozása során azonban érdekes eredmény adódott: japán és amerikai csoportok egyidejűleg fedezték fel az addig ismeretlen $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ fémközi vegyületet, amely jelenleg a legjobb (legnagyobb tárolt mágneses energiájú) permanens mágnes. Alkalmazásának fő korlátja a viszonylag alacsony Curie-hőmérséklete (585 K).

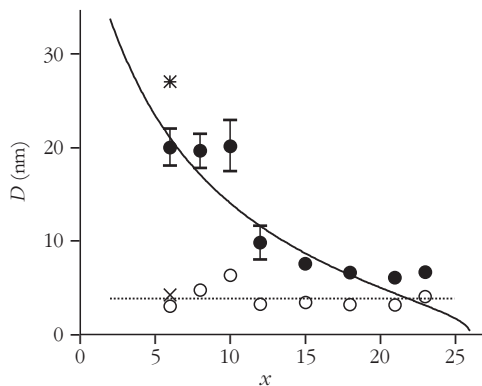
A lágymágneses anyagok fejlesztésének következő, máig tartó fejezete a nanokristályos ötvözetek megjelenése.

Jelenleg ezek a legjobb paraméterekkel jellemezhető anyagok, amelyek iránt megnyilvánuló technikai érdeklődést jól mutatják az egyes összetételekhez kapcsolódó fantázianevek: FINEMET = $nc\text{Fe}_{73,5}\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Cu}_1$, HITPERM = $nc\text{Fe}_{44}\text{Co}_{44}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$, NANOPERM = $nc\text{Fe}_{88}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$ (nc = nanokristályos). Ezeket a nanokristályos ötvözeteket az azonos összetételű, olvadákból gyorsított amorf szalagok részleges kristályosításával állítják elő, amelynek következtében D karakterisztikus méretű tck kristályszerkezetű szemcsék válnak ki a visszamaradó amorf mátrixból, melynek jellegzetes átlagvastagságát d -vel jelöljük (7. ábra). Ha a kristályos szemcsék mérete néhány száz nanométer alatti – azaz a doménfalak vastagságánál kisebb –, akkor a szemcsék egy doménből állnak, így a szemcsékben a mágnesezésnél nincs doménfal-eltolódás. A visszamaradó amorf kötőszövet már említett könnyű mágnesezhetősége kombinálódik így módon a kristályos mágneses szemcsék nagyobb telítési mágneszettségével, és ez eredményezi a kitűnő lágymágneses tulajdonságokat. A tiszta vas egyensúlyi állapotban nem oldja sem a Zr-ot, sem a B-t; így a kristályosodás során ezeknek a komponenseknek el kellene távozniuk a szemcsékből. Ezt kihasználva a Zr- (és Nb-) összetevő szolgál arra, hogy a kristályos szemcsék növekedése megálljon a nanométeres tartományban: erős kölcsönhatásuk a B-szennyezésekkel jelentősen csökkenti a kidiffundálás sebességét, és a szemcsehatáron (az összekötő amorf szövetben) feldúsulva a további szemcsenövekedést megakadályozza. Az 1%-nyi Cu-adalék a kristályosodás megindulásának hőmérsékletét csökkenti, a rézszemcsék korai kiválása helyet biztosít a többi komponens mozgása számára.

Részletes vizsgálatokat végeztünk a nanokristályos $\text{Fe}_{92-x}\text{Zr}_7\text{B}_x\text{Cu}_1$ ($2 \leq x \leq 23$) ötvözeteken, amely a NANOPERM összetétel kiterjesztett koncentrációtartománya, és még kezelhető számú komponenset tartalmaz. A Mössbauer-spektroszkópia ideális ezen kétfázisú ötvözetek vizsgálatára, mert egyidejűleg ad információt mindkét fázis

7. ábra. Nanokristályos ötvözet sematikus szerkezete: D a kivált szemcsék karakterisztikus mérete, d a visszamaradó amorf kötőszövet vastagsága.



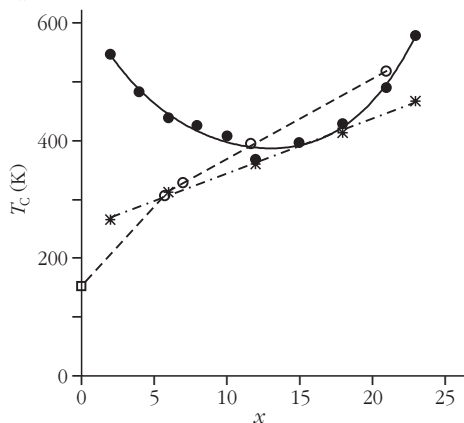


8. ábra. Nanokristályos $\text{Fe}_{92-x}\text{Zr}_7\text{B}_x\text{Cu}_1$ ötvözetekben a kivált *tck* $\text{Fe}(\text{Zr}, \text{B})$ szemcsék mérete (telt körök) és a visszamaradó amorf kötőszövet átlagos vastagsága (üres körök).

lokális jellemzőiről. A 2.d ábra tipikus spektrumot ábrázol: a külső vonalak a szatellittel a kivált *tck* szemcsékhez tartoznak, területük arányos az ebben a fázisban található Fe-atomok számával; a belső, pontozott, strukturálatlan komponens a visszamaradó amorf fázis járuléka. A 2.a és 2.d ábrán a szatellitok hasonlósága világosan mutatja, hogy a nanokristályos szemcsék nem tiszta α -vasból állnak, hanem maradt bennük néhány százaléknyi oldott Zr- és B-szennyezés. Ez azért fontos megállapítás, mert az irodalomban gyakran fellelhető tévedés a szemcse határretegének tulajdonítani ezen szennyezések okozta effektusokat. A kiinduló amorf fázis összetételének és a szemcsékben kivált vas mennyiségének ismeretében meghatározható volt a visszamaradó amorf fázis összetétele, amely 67 at. % Fe-nak adódott, a Zr/B arány a kiinduló összetételnek megfelelő maradt. Röntgendiffrakciós mérésekből megkaptuk a kivált szemcsék karakterisztikus méretét, ennek és a szemcsék mennyiségének ismeretében pedig kiszámítható a visszamaradó amorf kötőszövet átlagos vastagsága (8. ábra). Némileg meglepő, hogy ez összetételtől függetlenül állandónak, körülbelül 4 nm-nek adódott.

Alapvető jelentőségű és sok vitát kiváltó kérdés a mágneses szemcsék közötti, az amorf kötőszöveten keresztül történő csatolás mechanizmusa. Ez sokban hasonló a mágneses olvasófejekben felhasznált nemmágneses vékonyré-

9. ábra. Curie-hőmérsékletek függése a B-koncentrációtól: nanokristályos $\text{Fe}_{92-x}\text{Zr}_7\text{B}_xCu_1$ ötvözetekben a visszamaradó amorf fázisban (telt körök), a kiinduló összetételű amorf fázisban (üres körök) és az amorf $\text{Fe}_{67}\text{Zr}_{33-x}\text{B}_x$ ötvözetekben (csillag).



teggel elválasztott mágneses rétegek közötti kölcsönhatás kérdéséhez. A szokásos válasz – a vezetési elektronok által közvetített, a rétegek közötti távolsággal oszcilláló kicserélődési kölcsönhatásra (RKKY-kicserélődésre) csak közvetett indikáció utal. Ilyen kölcsönhatás a nemmágneses rétegben mágneses polarizációt indukálna, melynek egyértelmű kimutatása a nemegyensúlyi rendszerekre jellemző lehetséges keveredés miatt (az egyensúlyi állapotban nem oldódó mágneses atomok bediffundálhatnak a nemmágneses rétegbe) igen nehéz. A kölcsönhatás másik következménye lehet a mágneses rétegek közötti alacsonyabb Curie-hőmérsékletű mágneses fázis Curie-hőmérsékletének növekedése. Meglepő módon erre utaltak a NANOPERM ötvözet adatai: az amorf kötőszövet Curie-hőmérséklete (≈ 480 K) lényegesen magasabb volt, mint a kiinduló amorf fázisé (≈ 300 K). Általában a ferromágneses anyagok Curie-hőmérsékletének növelése – bár gyakorlatilag rendkívüli fontosságú – a nehezen megoldható feladatok közé tartozik. A csökkentése szinte triviális: nyomás hatására megvalósul, azaz általában amikor a mágneses atom térfogata csökken, a Curie-hőmérséklet is csökken. Ha a mágneses atomok koncentrációja nem változik, akkor a nemmágneses atom nagyobb méretű nemmágneses atommal való helyettesítése is ilyen fajlagos térfogatcsökkentésként értelmezhető és a ferromágneses átalakulási hőmérséklet csökkenését vonja maga után, mint az a 9. ábrán a tömbi (nem nanoméretű) amorf $\text{Fe}_{67}\text{Zr}_{33-x}\text{B}_x$ ötvözet esetén látható. Egyértelmű a 9. ábrán látható adatokból, hogy a nanoméretű amorf kötőszövet Curie-hőmérsékletének alacsony B-tartalomnál megfigyelt jelentős növekedése anomális, nem követi a tömbi méretekben megszokott trendeket. Az is nyilvánvaló, hogy ez az anomális növekedés nem lehet kicserélődési polarizáció eredménye, mert nagy B-tartalomnál nem figyelhető meg ilyen anomália, másrészt a kötőszövet vastagsága a B-koncentráció függvényében állandó marad. Az anomália lehetséges magyarázataként a nanokristályos szerkezetben fellépő húzófeszültségek okozta térfogat-növekedés szolgálhat. Általában az amorf fázis térfogata a távolságfluktuációk miatt néhány százalékkal nagyobb, mint a kristályos fázisé. A nanokristályos szemcsék kiválásakor a szemcse kisebb térfogata szükségszerűen húzófeszültséget fejt ki a visszamaradó amorf fázisra, ez annál nagyobb mértékű, minél nagyobb a kiváló fázis mennyisége, ezért nő a csökkenő B-tartalommal.

A mesterségesen előállított nanoszerkezetekben (mágneses multirétegek, nanokristályos ötvözetek) gyakoriak a komponensek méretkülönbségéből adódó mikroszkopikus feszültségek. A feszültségek befolyásolják a mágneses anizotrópiát a magnetostrikció révén, de várható a mágneses momentumok nagyságának és csatolásának (Curie-hőmérsékletének) változása a fajlagos atomi térfogatok módosulása miatt, melyek kiderítése a jövő kutatási feladatai közé tartozik.

Köszönetnyilvánítás

Ez a cikk a 2003. évi Fizikai Fődíj odaítélése alkalmából készült. A fenti szemelvényekkel illusztrált kutatást az tette számomra lehetővé, hogy Pál Lénárd ajánlására Keszthelyi Lajos Mössbauer-csoportjában kezdhettem munkámat.

A 21. században a világ energiahelyzetében jelentős szerkezeti átalakulások várhatók. Talán a legfontosabb a felhasználás regionális átrendeződése, aminek következtében az energiapolitika súlypontja a fejlődő világra helyeződik át. Jelenleg a fejlődő világra jut az összes energiafelhasználás harmada, ez az arány néhány évtizeden belül meg fogja haladni az 50%-ot, és a régió növekvő, majd meghatározó szerephez jut a világ energiaviszonyainak alakításában.

A fejlett világ energiafelhasználásának évenkénti növekedése a következő évtizedekben az energiatudatos szemlélet, az energiatakarékosságra való törekvés, valamint a magas energiaárak hatására 1% körül, vagy az alatt fog alakulni. Ugyanakkor a fejlődő világban több körülmény lényegesen gyorsabb növekedést kényszerít ki. Ezek egyike a népszaporulat. Az ENSZ demográfiai prognózisa szerint a világ népessége a jelenlegi 6,5 milliárdról a század közepére megközelíti a 10 milliárdot, a növekedés jóformán teljes mértékben a fejlődő világban következik be, mindenekelőtt a nagy megapoliszokban. A Föld minden új lakosát táplálni és ruházni kell, fedél is kell a feje fölé, szerény igénye még iparcikkekre is lehet, mindez többlet-energiafelhasználással jár.

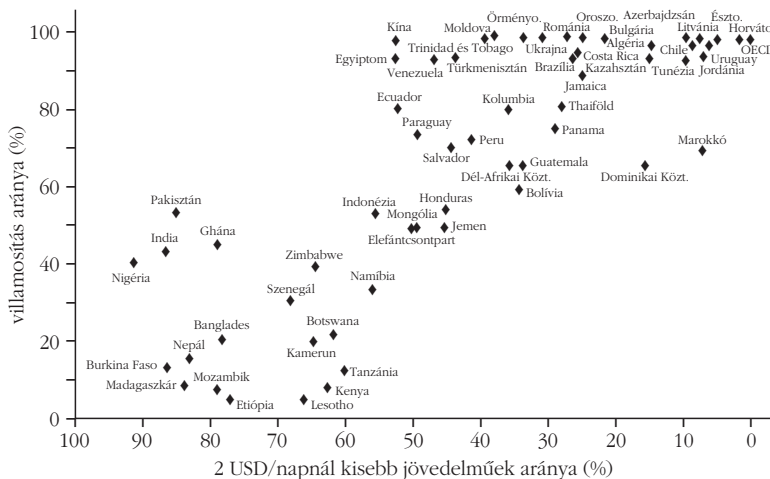
Egy másik kényszerítő körülmény az elmaradottságot és mostoha életkörülményeket okozó gazdasági leszakadás, ami nem független az energia rendelkezésre állásától. Az IEA (International Energy Agency, Nemzetközi Energiaügynökség) vizsgálata (1. ábra) például korrelációt mutat a villamosítás mértéke és a szegénység aránya között – szegénynek tekintve a napi 2 USD-nél kevesebből élők (a nagyon szegények jövedelme napi 1 USD-nél is kevesebb). Jelenleg az emberiségnek mintegy negyede él a fejlődő világ olyan térségében, ahová nem jut el a villany. Ennek súlyos következményei vannak, például villany nélkül nem alakítható ki megfelelő infrastruktúra, többek között nem biztosítható jó minőségű ivóvíz, és bénák az egészségi ellátáshoz szükséges eszközök. Villany nélkül nem lehet hírközlést és informatikát létrehozni, ezek nélkül az emberek el vannak zárva a külvilágtól, tájékozatlanok a világ fejlődéséről, az új lehetőségekről, mindez visszahat az oktatásra és a szakmai képzésre is. Villamosság nélkül nincs ipartelepítés, ami nemcsak technikai elmaradást konzervál, hanem jelenti munkahelyek és jövedelem-szerzési lehetőségek hiányát is.

Egy további – az emberiség harmadát érintő – példa az energiahelyzet és a szegénység kapcsolatára (2. ábra), hogy ahol az emberek nem jutnak hozzá kereskedelembe for-

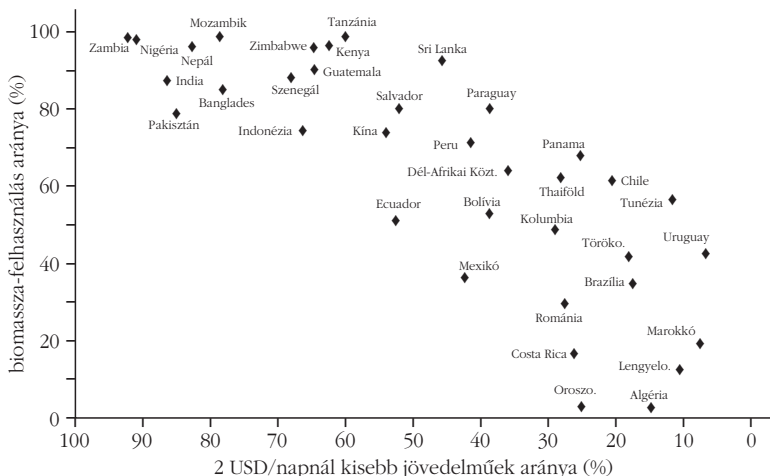
galmazott energiahordozókhoz, ott a környezetükben található éghető anyagokkal főznek, fűtenek, melegítenek. Ez is az elmaradottságot konzerválja, akadályozva az ipar és a közlekedés kívánatos mértékű fejlesztését.

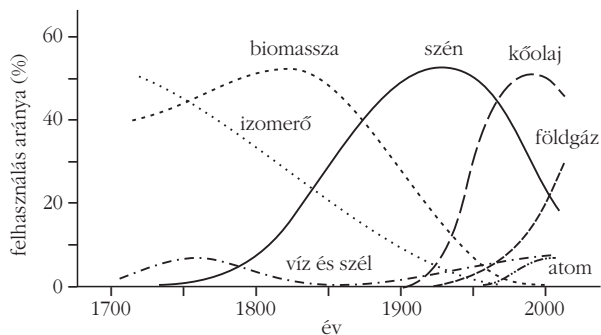
Az elmaradottság csökkentése a fejlett világnak is érdeke, mert az a melegágya a gazdasági migrációnak, az etnikai konfliktusoknak, a fundamentalizmusnak, a terrorizmusnak, vagyis mindazon jelenségeknek, amelyekről a fejlett országok rettegnek. A fejlődő világ jó néhány országa már elindult a felzárkózás irányába. Kína évente 8–9%-kal növeli energiafelhasználását, India 3–4%-kal, és számos más országban (Brazília, Indonézia, Pakisztán, Mexikó, a kistigrisek, egyes olajországok stb.) a világtáznál sokkal gyorsabb a fejlődés. Módosul a gépipari termékek piaca is, már a következő öt évben is a fejlődő világba irányul a világ energetikai gépgyártási termékeinek harmada. Az átrendeződésnek lehetnek előre nem látható következményei is. Például az energiaellátás exportrelációinak módosulása, a világ olajellátásában a 2004. évi zavar egyik oka a kínai és indiai import gyors növekedése

1. ábra. Kapcsolat a szegénység és a villamosítás között



2. ábra. Kapcsolat a szegénység és a lakosság biomassza-felhasználása között





3. ábra. Az energiafelhasználás szerkezete

volt (Kína olajimportja 2003-ban 38%-kal nőtt). Az üvegházhatás mérséklésével kapcsolatos politikát is befolyásolhatja, hogy Kína és India hatalmas szénvagyonának gyorsított kitermelésével kívánja energiagondjait enyhíteni, és őket nem terheli kötelezettség a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésére.

Ugyancsak jelentős átrendeződés várható az energia-szerkezetben. A 3. ábra sematikusan mutatja, hogy az idő folyamán hogyan adták tovább a stafétabotot a különböző energiahordozók az emberiség energiaszükségletének kielégítése érdekében. Ennek során egyes energiahordozók nem azért szorultak háttérbe, mert a forrásaik elapadtak, hanem felhasználhatóvá vált egy előnyösebb műszaki és gazdasági tulajdonságokkal jellemezhető másik energiahordozó. A változásoknak tetemes időigénye volt, ahogy az alapvető energetikai létesítmények hosszú élettartama az átrendeződést lehetővé tette.

Az energiaszerkezet átalakulása a világ energiaigényének folyamatos növekedése közben zajlott. Ez a növekedés a 21. században tovább fog folytatódni, valószínűleg a korábbinál lassabban. De a kisebb növekedési ütem is hatalmas energiafelhasználást jelent, olajjegyentékben mérve a század száz éve alatt jó néhány billió tonnát. E hatalmas energiaéhség kielégítése nem ígérkezik könnyű feladatnak.

Jelenleg a világ energiaszükségletének mintegy 80%-át ásványi tüzelőanyagokkal – kőolajjal, földgázzal, szénnel – fedezik. E tüzelőanyagok dominanciája még hosszú ideig megmarad, de szerepük az energiamérlegben módosulni fog. Ha a gazdasági szempontokat figyelmen kívül hagyva összegezzük a világ művelelő és reménybeli ásványi eredetű tüzelőanyag-vagyonát, akkor az összevethető a 21. század kumulált szükségletével. Megalapozottnak tűnnek a prognózisok e tüzelőanyagok termelésének bővülésére a következő évtizedekben, bár vannak előrejelzések a kőolaj- és a földgáztermelés beszűkülésére néhány évtizeden belül. A világ kőolajtermelésének 2–3 évtizeden belüli tetőzését feltételező jóslatok arra alapulnak, hogy csökkent egyrészt a földtani kutatások találati valószínűsége, másrészt a legnagyobb olajmezők hozama. A feltételezést kétségesse teszi, hogy hasonló prognózisok szinte végigkísérték a 20. századot, miközben a világtermelés a század eleji néhány millió tonnáról a századvég néhány milliárdos termelésére nőtt. A század utolsó évtizedeiben pedig a vagyon egyenesen gyorsabban nőtt a termelésnél, nem kis mértékben a mélytengeri előfordulá-

sok kiaknázhatóvá válásának köszönhetően (a Mexikói-öbölben már 3 km mély tenger alól folyik termelés).

Ha mégis beszűkülne a kőolajellátás, vannak lehetőségek – nem olcsón – a közlekedés üzemanyag-ellátásának megoldására. A nem konvencionális olajelőfordulások (bitumenes homok, olajpala) vagyona meghaladja a hagyományost. Ilyen kőzetekből – melyekben a folyékony fázis erősebben kötődik a szilárdhoz – a kinyerhető nehézőlaj termelése Kanadában és Venezuelában folyik. Vannak eljárások a szén cseppfolyósítására, így gyártott műbenzint Németország és Japán a második világháború idején, valamint a Dél-Afrikai Köztársaság az apartheid miatti embargó évtizedeiben. Ugyancsak előállítható folyékony üzemanyag földgázból, és üzemanyagként használható PB-gáz is. Nagy cukor-, illetve keményítőtartalmú biomasszából alkoholok (pl. etanol, metanol), olajos magvakból észterek (pl. biodízel) állíthatók elő. Az Európai Unió a biomasszából gyártott üzemanyagok arányát az évtized végéig 3,75%-ra kívánja növelni. Brazília egy nagyléptékű program segítségével etanol használatára térítette át gépkocsiforgalmának jelentős részét. Több országban forgalmaznak benzín-etanol keveréket, a második világháborúban motalkol néven árusították Magyarországon is. És a háttérben ott van a hidrogén ígérete, ami az energiabázist nem bővíti ugyan, hiszen vegyületekből (víz, szénhidrogének) kell kinyerni, több energia befektetésével, mint amennyi az égésénél felszabadul. De átalakíthatja az energiaellátást, ha például atomenergiával állítják elő tengervízből, vagy ha háttérbe szorítja a belső égésű motorokat a tüzelőanyag-cellák révén. Van mód a földgáz pótlására is, nem konvencionális előfordulásokból (szénlencsék metántartalma, geonyomásos zónák, hideg tengerek metán-klatrátai), szénből szintetizált földgázzal (SNG), vagy hidrogénnel.

Az ásványi tüzelőanyagok háttérbe szorulása már megindult. A 3. ábrán látható, hogy a szén részaránya évtizedek óta csökken, ahogy hasznosítása az erőművekre és a kohászatra szorul vissza, mert azok a nagy létesítmények könnyebben elviselik a környezetszennyezést csökkentő járulékos költségeket. A szénbányászat pozíciójának megőrzésére jelentős erőfeszítéseket tesz („tisztá szén” programok). A füstgázból szennyezők (SO_x, NO_x, pernye) kivonása, illetve egyesek megkötése a tüzelésnél (fluid tüzelés) már ipari gyakorlat. A szén-elgázosításra alapuló technikák („tisztá gáz” tüzelés, elgázosításra alapuló kombinált gáz-gőz körfolyamat) most kezdenek terjedni. Meghonosodóban van az erőművi körfolyamat szuperkritikus gőzparaméterekkel, a jobb hatásfok fajlagosan csökkenti a CO₂ kibocsátást. Kutatják, hogyan lehet a szén-dioxidot kivonni a füstgázból és tárolni (tengervízben, leművelt szénhidrogénmezőkben, akviferekben stb.). A kőolaj részarányának mérséklődése is megindult, ahogy a magas árak miatt a kőolajtermékek kiszorultak a tüzelőberendezésekből. A legelőnyösebb tüzelőanyag, a földgáz részaránya még növekvőben van.

Az ásványi tüzelőanyagok háttérbe szorulását több körülmény idézi elő. Első helyen említendő óhatatlan drágulásuk, ahogy a legelőnyösebb előfordulások kiapadása miatt kedvezőlenebb és ezért drágábban kitermel-

hető vagyonekat kell művelésbe vonni. Jelentős a környezetvédelem szerepe, a szigorodó követelményeknek eleget tenni mind nehezebb és mind költségesebb. Közrejátszik, hogy a fenntartható fejlődés igénye erősödik az energiapolitikai állásfoglalásokban, valamint a települések döntéseiben (pl. hogy a területükre milyen létesítményeket fogadnak be). Az erőforrások kímélését, az eredeti környezet megóvását nem az ásványi tüzelőanyag termelésére és hasznosítására találták ki.

A fenntartható fejlődésnek leginkább a megújuló energiák felelnek meg, környezetszennyezésük kicsi, mivel a természetet csak a berendezések gyártása és hulladékai terhelik. Ezért támogatást érdemelnek, amire rá is szorulnak, mert ritkán versenyképesek. Ez elsősorban a magas fajlagos beruházási költségen múlik, aminek legfőbb oka, hogy ezek az energifajták diszperzek, térbeli teljesítménysűrűségük kicsi, ezért az energiát nagy felületről kell összegyűjteni, sok anyagot igénylő, nagyméretű és költséges berendezésekkel. Tovább növeli a költségeket időszakos (intermittens) jellegük. Mivel akkor is szükség van energiára, amikor nem süt a Nap, nem fúj a szél, kicsi a vízhozam vagy a terméshozam, az ilyen időszakok áthidalására vagy energiáról berendezésre, vagy más energifajttával működő tartalékkapacitásra van szükség. Az is rontja a versenyképességet, hogy – a vízerőművek kivételével – kicsi az átalakítási hatások, ezért például villany, hő, mechanikai munka szolgáltatásához energiaértékben többször annyi megújuló energia szükséges, mint tüzelőanyag.

A műszaki fejlesztés csökkenteni fogja ezeket a hátrányokat, a tüzelőanyagok drágulása is növeli a versenyképességüket, így a megújuló energia hasznosítása terjedni fog, de az illúzió, hogy kizárólag azzal megoldható az emberiség energiaproblémája. A reális lehetőségek összege sem elegendő az emberiség jelenlegi energiaszükségletének a fedezésére, még ha mellőzik is a gazdasági szempontokat. A hidrológusok szerint a Föld kihasználatlan vízfolyásaira még 2–3 TW erőműkapacitás telepíthető – ha a zöldek nem elleneznék. Ez még egy évtizedre sem fedezné a világ szükségletét új erőművekre, amik az igénynövekedés fedezetére, valamint a leselejtezésre kerülő erőművek pótlására kellenek. Hasonló potenciálra lehet számítani a szélenergiánál is. Ugyan a légtömegekben tárolt energia hatalmas, gyakorlati hasznosításra annak legfeljebb a talajszint feletti 100–200 m-es rétegre eső kicsi töredéke jöhet számításba. Erőműveket a felszínnek csak egy kis hányadára lehet telepíteni, kiesnek a terület mintegy háromnegyedét kitevő nehezen megközelíthető térségek – magas hegyek, őserdők, sivatagok (de a sekély tengerek 20–30 km-es partmenti övezete számításba jöhet), a civilizált régiókban pedig sok területet vesznek igénybe más célokra – mezőgazdasági művelésre, városok, ipartelepek, közlekedési útvonalak helyfoglalására –, a zavartatás miatt még az információátvitel csatornáit is figyelembe kell venni.

A Földön található biomassa 80%-át az erdők faállománya tartalmazza. Ésszerű erdőgazdálkodással a világon kitermelhető tűzifa energiaértéke ~100 EJ, a mezőgazdasági hulladékokból ~30 EJ nyerhető, vagyis a hasznosít-

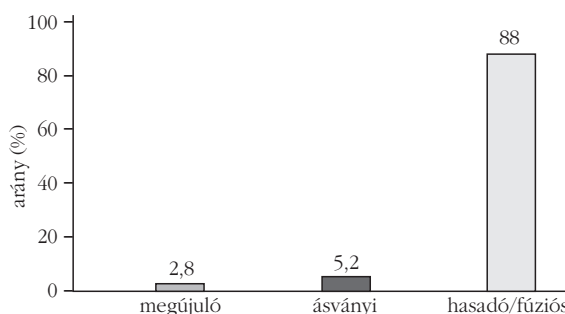
ható biomassa potenciál az emberiség jelenlegi ásványi tüzelőanyag felhasználásának a harmada. A legnehezebb a napenergia-hasznosítás lehetőségét felmérni. Az üvegházhatás, ózonlyuk, savas esők, szmogok, élővizek kikapcsolása és hasonló jelenségek kapcsán megtapasztaltuk, hogy viszonylag kis emberi beavatkozással alaposan meg lehet zavarni a természet egyensúlyát. A talajszintre érő napsugárzás 1%-e szolgál a minden földi életet fenntartó fotoszintézis fedezésére, talán ugyanennyit el lehet vonni energetikai célokra is, a napenergia sokirányú szerepének sérelme nélkül. A szárazföldeket érő napsugárzás 22 PW, annak 1%-e 22 TW, a területkihasználás lehetősége körülbelül megegyezik a szélenergiáéval (bár a tengerek parti övezete elesik, viszont az épületek külső felületének egy része számításba jöhet). Ha figyelembe vesszük a napi és az évszaki szezonalitást, valamint az alacsony átalakítási hatásfokot, a napenergia hasznosítható potenciálja a világ jelenlegi energiaszükségletének csak töredékét teszi ki.

A tengerekben rejlő hatalmas potenciálok (hullámzás, áramlások, trópusi tengerek függőleges hőfokkülönbsége, folyótorkolatoknál a sókoncentráció különbsége) hasznosítására vannak kísérletek, de a technikai nehézségek miatt a siker kérdéses. Egyedül az árapályt sikerült kiaknázni, de annak összesített lehetősége nem nagy.

Biztos megoldás híján tovább kell keresni az energiabázis kibővítésének lehetőségét, így jön a képbe az atomenergia. A jelenlegi technológia nem ígér tartós megoldást, alkalmazásával a műrevaló uránvagyomból nyerhető energia a világ műrevaló olajvagyonának a harmadát sem éri el. A jelenlegi reaktorok a ^{235}U izotóp láncreakciójára alapulnak. Ezen izotóp koncentrációja a természetes uránban csak 0,7%, és azt a keveset is rossz hatásfokkal hasznosítják. Szerencsére van kiút: neutronbesugárással tenyésztanyagokból hasadóanyagok nyerhetők, így az urán 99,3%-át kitevő ^{238}U -ból és a ^{232}Th -ból. Ezzel hatalmas energetikai potenciál hasznosítása előtt nyílik út, ami nagyságrenddel meghaladja a 21. század szükségletét. Az atomenergetika nagy ígérete a fúzió hasznosítása, annak energetikai kihatásai felmérhetetlenek, hiszen a vízben minden 6700-ik hidrogénatom deutérium, ami a fúzió legfontosabb üzemanyaga. De a legoptimistábbak sem tétélezik fel, hogy fél évszázadnál hamarabb megteremtethető egy fúziós erőmű feltételei.

A 4. ábrán látható becslés mutatja, hogyan aránylik a 21. század energiaszükségletéhez a megújuló energiák, az ásványi tüzelőanyagok, és a hasadó anyagok reálisan

4. ábra. A 21. század energiaszükségletének kielégíthetősége



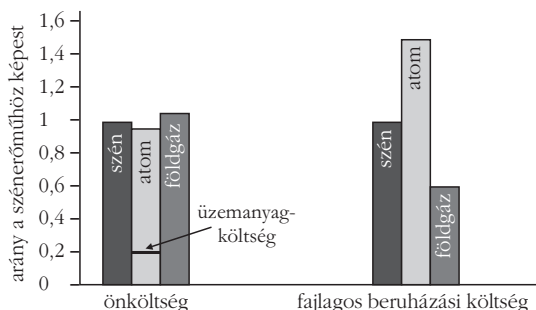
1. táblázat			
Az atomenergia-ellenesség okai és a biztonság fokozása			
	2. generáció	3. generáció	4. generáció
nukleáris biztonság	elfogadható	fokozott	inherens
radioaktív hulladékok	geológiai elhelyezés	geológiai elhelyezés (újrafeldolgozás)	transzmutáció
prolifерáció	atomsorompó és járulékos megállapodások		visszacirkulálás

figyelembe vehető potenciálja. Az ábra azt sugallja, hogy mennél messzebb tekintünk az időben, annál valószínűbb, hogy atomenergia nélkül nem oldható meg a világ energiaellátása. Ennek azonban feltétele egyrészt a társadalmi elfogadtatás, másrészt a gazdasági versenyképesség.

Az elmúlt évtizedekben a társadalom viszonya az atomenergiához ellentmondásos volt. Sok ember érezte úgy, hogy az egy kiszámíthatatlan, uralhatatlan veszélyforrás, amit mihamarabb ki kellene iktatni az emberiség életéből. Azok az országok, amelyekben ilyen nézetek uralták a közhangulatot, le is mondtak az atomenergia alkalmazásáról, egyesekben még a kifogástalanul működő atomerőművek idő előtti leszerelése is napirendre került.

Az utóbbi időben az antinukleáris álláspontok lazulása következett be. Erre utal, hogy változott az antinukleáris és pronukleáris államok között lavírozó nemzetközi szervezetek (pl. Európai Unió Bizottsága, OECD) magatartása. Korábbi óvatos távolságtartásukat („az atomenergia alkalmazása az országok belügye”) felváltotta az atomerőművek előnyeinek az elismerése, elsősorban a környezetvédelem és az ellátásbiztonság területén. A szemléltetést az energetika területén jelentkező nyomasztó gondok (olajár hatása, importfüggés növekedése, ellátásbiztonság lazulása, kyotói vállalások teljesítésének nehezítése stb.) kényszerítették ki. A korábbi antinukleáris felfogás enyhülése is tapasztalható némely országban. A legnagyobb változás az Egyesült Államokban következett be, ahol a Three Mile Island erőmű üzemzavara óta (1979) az atomerőművek megtúrt létesítményekké váltak, újak építésére senki sem mert gondolni. Pár éve viszont az atomenergetika az állami energiapolitika egyik pillérévé lépett elő, és ami még fontosabb, a lakosság túlnyomó többsége még új atomerőművek építését is támogatja. A

5. ábra. Alaperőművek relatív gazdasági mutatói



közvélemény ilyen alakulását a társadalmat sokkoló fejlemények idézték elő: az energiainport nagy aránya, az olajpiac zavarai, villamosenergia-rendszerek összeomlása, energiaszolgáltató vállalatok csődje stb.

Az atomerőművekkel kapcsolatos ellenérzéseket és félelmeket főleg három kifogás gerjeszti:

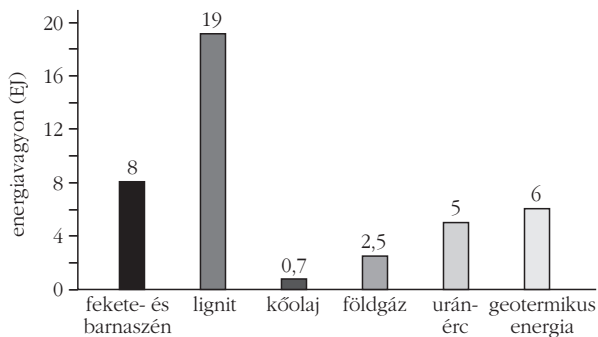
1. az atomerőművek nem elég biztonságosak,
2. a radioaktív hulladékok veszélyessége uralhatatlan,
3. az atomerőművek előmozdítják az atomfegyverek elterjedését.

Ezek a kérdések a jelenlegi – második generációs tekintet – atomerőművek esetében is uralhatók, amit a gyakorlati tapasztalatok is alátámasztanak (1. táblázat). Időközben kifejlesztették a harmadik generációs atomerőműveket, lényegesen kedvezőbb biztonsági és gazdasági mutatókkal. Már jó néhány ország (Finnország, Franciaország, Japán, Kína, Dél-Afrikai Köztársaság) eldöntötte ezek létesítését, az USA-ban hat konzorcium alakult ilyenek megvalósítására, a megvalósíthatósági vizsgálatok költségeinek a felét az amerikai kormány vállalta magára. Célröröző kutatás is indult olyan teljesen új elveken alapuló rendszerek kifejlesztésére, melyek okafogyottá teszik az ellenérveket. Az országok szinte sorban állnak, hogy csatlakozzanak e IV. generációs amerikai programhoz, az MTA vizsgálja részvételünk célszerűségét és lehetőségét.

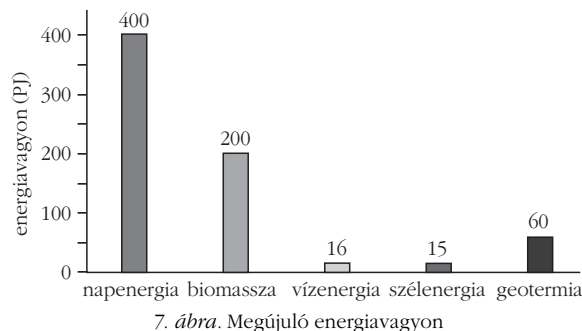
Az inherens biztonság a működési elv révén zár ki számottevő radioaktivitás kijutásával járó üzemzavarokat. A transzmutáció a hosszú felezési idejű izotópokat besugárással alakítja át rövid felezési idejű, vagy stabil izotóppokká, ezzel elenyészik a kiégett fűtőelemek tárolásával kapcsolatos gond. Az aktinidákat visszacirkuláltatva vagy energiatermelésre hasznosítják, vagy transzmutálják, így az üzemanyagciklusból nem kerül ki fegyvergyártásra használható anyag.

Az 5. ábra a német szén-, atom- és kombinált ciklusú földgáz-erőművek gazdasági mutatóit szemlélteti. A termelt villamos energia önköltsége között nincs nagy különbség, a sorrend a földgáz áráról függ. Az atomerőmű fajlagos beruházási költsége azonban kiugróan magas, annak csökkentése a versenyképesség fontos feltétele. Erre sok lehetőség és elképzelés van: tipizálás, előgyártás, védelmek és irányítástechnikai rendszerek digitalizálása, önellenőrző berendezések, passzív beavatkozó rendszerek, számítástechnika alkalmazása, nyitott tetős építés stb. A versenyképességet az élettartam hosszabbítása is növeli. Üzemelő erőműveknél erre az ad módot, hogy a fő berendezések jóval lassabban öregednek a korábban feltételezetténél, így a működtetés meghosszabbítható a biztonság veszélyeztetése nélkül.

Elvértve már előfordult atomerőművek élettartamának meghosszabbítása, de ez tömegessé az Egyesült Államokban vált. Az ott üzemelő 104 nagy blokk legtöbbször erre törekszik, több mint harmaduk már meg is kapta az engedélyt, hogy az eredetileg engedélyezett 40 éven felül további 20 évig üzemben maradhassanak. Mivel ezek az erőművek eredeti élettartamuk során az alapterhelés tőkeköltségeit (az önköltség 60–70%-a) már leírták, a hosszabbított időszakban az önköltség domináns része a fűtőelemek ára (15–20%), amihez hasonló mértékű üze-



6. ábra. Magyar ellátottság ásványi energiáhozozókból



7. ábra. Megújuló energiavagyon

meltetési és karbantartási költség járul. Vagyis ebben az időszakban olcsóbban termelik a villamos energiát minden más erőműtípusnál. Ettől nagyon megnőtt az ázsio-juk, a legtöbb atomerőművet már felvásárolták olyan társaságok, melyek a régi telephelyeken új blokkokat is szándékoznak létesíteni.

Az eddigi vizsgálatok szerint a Paksi Atomerőmű élet-tartamának mintegy 20 éves hosszabbítása műszakilag megoldható, megvalósítása a szükséges társadalmi és politikai háttér megeremtésén múlik. Ez a magyar energiapolitika kulcskérdése, mivel energetikai ellátásbiztonságunk erősítésének jóformán ez az egyetlen eszköze. Az atomerőműnek tartósan stabilizáló hatása van, mivel a fűtőelemeket 4–5 év alatt „égetik” ki, és további évekre is egyszerűen tárolhatók friss fűtőelemek. Az energiáhozozók helyettesíthetősége révén ez az energiaellátás többi területét is befolyásolja. Az élettartam hosszabbításnak az ellátásbiztonság előmozdítása mellett más hatásai is vannak: hozzájárul a szén-dioxid kibocsátásának csökkentéséhez, előmozdítja a fogyasztói tarifa mérséklését, szerepe van a beruházási feszültség csökkentésében, katalizálja a műszaki fejlesztést. A következő évtizedben már a jelenlegi blokkok pótlására vonatkozó elképzelések kialakítását is napirendre kell tűzni.

Sajnos a magyar energiavagyon nagyon szerény. Ásványi tüzelőanyagokra ezt mutatja EJ-ban a 6. ábra, e nyil-vántartott vagyon tényleges felhasználhatóságának a helyzete elszomorító. Zsugorodó kőolaj- és földgázvagyonunkból a szükségleteknek egyre kisebb hányadát lehet csak fedezni. Az uránbányát be kellett zárni, mert a termelés önköltsége a világszintű ár többszörösére nőtt. Versenyképtelensége miatt mélyműveléses szénbányászatumk leépülése a vége felé tart. Geotermikus energiából nagy hatalom vagyunk, de a legtöbb forrás hőmérséklete csak helyi hasznosításra és alacsony hőfokú igények kielégítésére ad módot. Egyedül a külfejtéssel termelhető lignit ígéretes, a Mátra–Bükk vonulat lábánál található előfordulásra érdemes is lenne ~1 GW-nyi erőművet telepíteni. A másutt található lignitvagyon kiaknázhatósága valószínűtlen, mert aligha lehet a lakosság hozzájárulását elnyerni új külfejtés létesítéséhez.

Nem jobb a helyzet a megújuló energiák terén sem. A 7. ábra az elméleti lehetőségeket szemlélteti. Reálisan a biomassza és a napenergia hasznosítása ígéretes, de megváltani ezek sem fogják a magyar energiagazdálkodást.

Hazai energiapotenciál híján behozatalra szorulunk. 2004-ben energiaszükségletünk 73%-át importból fedez-

tük, ezt az arányt a gazdasági fejlődés és az életszínvonaljavulás tovább fogja növelni (évenkénti összes energiafelhasználásunk valamivel meghaladja az 1 EJ-t). Az import sérülékeny, azt politikai, gazdasági, műszaki, időjárás, szállítási és egyéb kockázatok terhelik. Lehetőségeink a bizonytalanságok ellensúlyozására nem nagyok.

A tüzelőanyag-készletek és erőművi tartalékkapacitások csak átmeneti zavarok ellensúlyozására alkalmasak. Az Adria-vezeték lehetővé teszi kőolaj-behozatalunk forrásának módosítását, más energiáhozozók importjának diverzifikálása korlátokba ütközik. Szállítóvezeték-híján földgázimportunk helyettesítésére, sőt bővítésére sincs mód. Pedig erre szükség lenne, mert a felhasználás gyors felfutása következtében egy kemény télen zavarok is felléphetnek a földgázellátásban. Ilyenkor ugyanis az importvezeték maximálisan le vannak terhelve, és a földalatti tárolók kitérülése csúcsra jár. Gondok alakulhatnak ki a villamosenergia-ellátásban is. Legnagyobb részben előregedő erőműveink pótlására a következő 10–15 évben 5–6 GW-nyi új forrásra lenne szükség, de ennek megvalósulása tisztázatlan. Kis erőművekből mintegy 0,5 GW kapacitásbővülés tetelezhető fel (főleg hőszolgáltatáshoz kapcsolva, illetve a megújuló energiákból). A villamos energia importjának növelhetőségét szomszédaink mögöttes hálózata 0,5–1 GW-ra korlátozza. A többi nagy erőművek építésével kellene fedezni, de erre nem ismeretesek szándékok, mivel hiányzik a gazdasági vonzerő. Az erőműépítés hosszú időbe telik, legfőbb ideje lenne megismerni a jövőre vonatkozó elképzeléseket.

A villamosenergia-ellátást sok bizonytalanság terheli. Ezért több lábra célszerű támaszkodni, hasznosítva minden olyan forrást, amely gazdaságosan és a társadalmi követelményeket kielégítve kiaknázható.

Irodalom

- BP Statistical Review of World Energy 2004 – <http://www.bp.com/centres/energy>
 IEA: World energy outlook 2004 – OECD/IEA, Paris, 2005.
 M. KING HUBBERT: The energy resources of the earth – Sci. Am. 225 (1971) 61
 Magyar Geológiai Szolgálat: Magyarország Ásványi Nyersanyagvagyona – MGSz. Budapest, 2003.
 VAJDA GY.: Energiapolitika – MTA Társadalomkutató Központ, Budapest, 2001.
 VAJDA GY.: A nukleáris energetika kilátásai – Fizikai Szemle 52/12 (2002) 326
 VAJDA GY.: Energiaellátás ma és holnap – MTA Társadalomkutató Központ, Budapest, 2004.
 World Energy Conference: Survey of Energy Resources – WEC London, 2002.

A RELATIVITÁSELMÉLET TANÍTÁSÁRÓL

Hraskó Péter
Pécsi Tudományegyetem
Elméleti Fizika Tanszék

Az utóbbi tíz évben sokat foglalkoztam a relativitáselmélet tanításával és népszerűsítésével, ezért az elméletet a korábbinál alaposabban át kellett gondolnom. Eközben több olyan fogalom revidálására is rákényszerültem, amelyekben azelőtt semmi kivétnevelőt sem találtam. Közöttük van a mozgási tömeg, amely bekerült az emelt szintű érettségi tételei közé. Erről a fogalomról lesz szó az alábbiakban.

A speciális relativitáselmélet egyik váratlan következménye az, hogy *minél nagyobb sebességgel mozog egy test, annál nehezebb tovább gyorsítani*. Pontosan ez lenne a helyzet akkor, ha a testek tömege nőne a sebesség növelésekor. De a gondolatmenet, amellyel a relativitáselméletben eljutunk ehhez a következtetéshez, világosan mutatja, hogy a jelenség oka nem a tömeg megnövekedése, hanem az *idődilatáció*.

Képzeljünk el egy rakétát, amelyben automata adagoló biztosítja, hogy a hajtóműben minden másodpercben pontosan ugyanakkora legyen az üzemanyag-fogyasztás, és vizsgáljuk a rakéta mozgását a pályájának egy viszonylag rövid szakaszán, amelyen az üzemanyag elhasználódásából származó tömegcsökkenés elhanyagolható a rakéta össztömegéhez képest. A newtoni mechanika szerint ilyen körülmények között a rakéta konstans gyorsulással fog mozogni. A tolóerő ugyanis állandó, és az

$$m dv = F dt \quad (1)$$

képletnek megfelelően a sebesség időegységre eső növekedése is konstans:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} = \text{konstans.} \quad (2)$$

A relativitáselmélet szerint azonban a külső megfigyelő számára a gyorsulás egyre kisebb és kisebb lesz, mert az adagoló berendezés az űrhajóbeli *sajátidő* ritmusában adagolja az üzemanyagot, és ez a sajátidő a

$$d\tau = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

képletnek megfelelően annál lassabban telik, minél nagyobb az űrhajó sebessége.

Kis sebességeknél ($v \rightarrow 0$ -nál) a newtoni mechanika a relativitáselméletben is érvényes, ezért az *űrhajóhoz képest* az (1) képlet igaz marad, csak időn természetesen az űrhajóbeli τ sajátidőt kell érteni:

$$m dv = F d\tau. \quad (3)$$

Ennek következtében az űrhajó gyorsulása *önmagához képest* továbbra is a konstans F/m -mel egyenlő. A földi

megfigyelő által észlelt gyorsulást úgy kapjuk, hogy a (3) képletben a $d\tau$ -t kifejezzük a földi időn keresztül:

$$m dv = F \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt, \quad (4)$$

amelyből

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (5)$$

Ez a képlet valóban azt mutatja, hogy a sebesség növekedésével a gyorsítás hatásossága csökken.

Az (5)-ben az idődilatációnak csak a gyorsulás okára (a gyorsító erő teljesítményére) kifejtett hatását vettük figyelembe. Nézzük most meg, mi lesz az idődilatáció hatása a sebességnövekedésre.

Jelöljük I' -vel azt az inerciarendszert, amelyhez képest a rakéta a t pillanatban éppen nyugszik. A rakéta azonban I' -hez képest is gyorsul, ezért a nyugalom állapota csak egy matematikai pillanatig tart, és a t időpillanatot követő rövid $d\tau$ sajátidő-intervallumban a rakéta I' -hez viszonyítva megtesz valamekkora – mondjuk dl_0 – utat. Ezalatt a rakéta sebessége I' -ben (vagyis „önmagához képest”) valamilyen dv' -vel nő meg. Mekkora dv sebességnövekedésként fog ez megjelenni az I -beli megfigyelők számára?

Abban az I inerciarendszerben, amelyből a rakéta mozgását figyeljük, a dl_0 -nak a Lorentz-kontrakció szerint

$$dl = dl_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

távolság, a $d\tau$ sajátidő-intervallumnak pedig

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

időintervallum felel meg. Logikus feltételezni, hogy dv ugyanúgy aránylik a dv' -höz, ahogy dl/dt aránylik a $dl_0/d\tau$ -hoz:

$$dv : dv' = \frac{dl}{dt} : \frac{dl_0}{d\tau}.$$

De a Lorentz-kontrakció és az idődilatáció előbbi képletei szerint ez az arány $(1 - v^2/c^2)$ -tel egyenlő, ezért

$$dv = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) dv'. \quad (6)$$

A (3) képlet tehát további pontosításra szorul, a dv -t dv' -vel kell helyettesíteni benne:

$$m dv' = F d\tau. \quad (7)$$

Ha most itt dv' -t és $d\tau$ -t kifejezzük a földi megfigyelők által észlelt dv -n és dt -n keresztül, az űrhajó gyorsulására az

$$a = \frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2} \frac{F}{m} \quad (8)$$

képletet kapjuk.

Ezt a képletet – a könnyebb érthetőség kedvéért – a rákéta példáján vezettük le. A nagy sebességgel mozgó testek gyorsulását azonban töltött részecskék elektromágneses térben történő mozgásánál figyelték meg (Kaufmann-kísérlet, 1901–1902). Érvényes-e (8) ebben az esetben is?

A legegyszerűbb eset az, amikor a Q töltésű részecske a konstans E elektromos térrel párhuzamosan mozog. Ekkor $F = QE$. De ebben az esetben a (7) képletben egy újabb módosítást kell végrehajtani. Az elektromos (és a mágneses) tér komponensei ugyanis általában megváltoznak, amikor új inerciarendszere térünk át, ezért (7)-ben F -et az I' -beli $F' = QE'$ -vel kell helyettesíteni. Abban a speciális esetben azonban, amikor az inerciarendszerek relatív sebessége párhuzamos az elektromos térrel, az elektromos tér mindkét inerciarendszerben ugyanakkora: $E' = E$. Így $F' = F$, (7)-en semmit sem kell változtatni, és a töltött részecskék gyorsulását is (8) határozza meg¹.

A (8) képlet korrekt, de az egyszerűsített gondolatmenet, amivel megkaptuk, tartalmaz egy olyan lépést, amelyet talán nem mindenki tartana meggyőzőnek (a (6) indoklására gondolok²). Az egyszerűsítés azonban olyan, hogy nem hamisítja meg, hanem inkább kiemeli a jelenség lényegét: Azért nehezebb a nagy sebességgel mozgó testet tovább gyorsítani, mert az idődilatació egyre hatékonyabbá válik.

A gondolatmenetben az idődilatación kívül a Lorentz-kontrakció is szerephez jutott, ezért a fenti indokláshoz a Lorentz-kontrakciót is hozzá lehet tenni. Magának a Lorentz-kontrakciónak a képletét azonban le lehet vezetni egyedül az idődilatacióból (ld. a *Függelék*et), ezért úgy gondolom, hogy elég, ha csak az idődilatacióra hivatkozunk.

Ismeretes, hogy a relativitáselméletben a v sebességgel mozgó test mozgási energiáját a

$$K = m c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) \quad (9)$$

képlet határozza meg. Ha ezt összehasonlítjuk a newtoni fizika

$$K = \frac{1}{2} m v^2$$

képletével, láthatjuk, hogy a relativitáselmélet szerint a mozgási energia a sebesség növelésekor gyorsabban nő, mint a newtoni fizika szerint: Amikor v tart a fénysebességhez, a két mozgási energia aránya végtelenhez tart.

Ez a tény egyenes következménye annak, hogy a nagyobb sebességgel mozgó testet nehezebb gyorsítani. A mozgási energia ugyanis a gyorsító erő munkájának rovására növekszik ($dK = F dx$), és egy adott sebességet nyilván hosszabb úton lehet csak elérni, ha a sebesség további növelése egyre nehezebbé válik.

Néhány alkalommal találkoztam olyan ellenvetéssel, hogy azért kell léteznie relativisztikus tömegnövekedésnek, mert a mozgó test nagyobb gravitációs hatást fejt ki, mint a nyugvó, és ha a tömeg mindkét esetben ugyanaz lenne, a gravitációs hatás se lehetne más.

Ez az ellenvetés azért hibás, mert a relativitáselmélet szerint (és itt már az általános relativitáselmületről van szó) a gravitációs hatás forrása nem a tömeg, hanem az energia (pontosabban az energia-impulzus-tenzor, de ehhez a legfontosabb járulékot az energia adja). A mozgó test gravitációs hatása tehát valóban nagyobb a nyugvóénál, de nem a tömeg, hanem az energia megnövekedése miatt.

Mind ezek alapján az a javaslatom, hogy a „mozgási tömeg” és a „relativisztikus tömegnövekedés” kifejezéseket ne használjuk, mert hamis magyarázatot sugallnak arra, hogy miért nehezebb a testeket tovább gyorsítani, amikor már gyorsan mozognak. Ha ezt elfogadjuk, akkor persze a „nyugalmi tömeg” terminusra sincs szükség. A „nyugalmi energia” kifejezést azonban, amely a „belső energia” szinonimája, kifejezetten célszerű használni, mert explicite utal arra, hogy a belső energia a nyugvó test energiájával azonos.

A fotonok zérus tömegű objektumok, de nagyon gyakran ezt úgy értik, hogy csak a nyugalmi tömegük nulla, a mozgási tömegük $h\nu/c^2$ -tel egyenlő. Arról, hogy ez milyen hibás következtetésekre vezet, korábban már részletesen írtam³, ezért az ottani érveimet most nem ismétlem meg.

A „mozgási tömeg” elnevezés az irodalomban nagyon elterjedt, de vannak figyelemre méltó kivételek. A *Speciális és általános relativitás elmélete* című könyvében *Einstein* nem használja ezt a kifejezést. A Landau–Lifsic sorozatban sem fordul elő, de hiánya a tíz kötetben sehol sem okoz problémát. *W.G. Dixon* kompromisszumos megoldást választott⁴: Az

$$\frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

menyiséget „látszólagos tömegnek” (apparent mass) hívja, és m -re megtartja a nyugalmi tömeg nevet.

Hogyan került be a fizikába az az elképzelés, hogy a tömeg esetleg függhet a sebességtől? Az 1880-as évek elején *J.J. Thomson* kezdte el alkalmazni a Maxwell-egyenleteket az anyag tulajdonságainak a vizsgálatára. A kutatás, amelybe sokan bekapcsolódtak, egyik fontos következtetése az volt, hogy mozgó töltés elektromágne-

¹ Amikor a töltött részecske gyorsulása merőleges a sebességére, a $3/2$ hatványkitevő $1/2$ -re módosul.

² A (6) pontos levezetése a relativisztikus sebességösszeadás képletéből a *Függelék*ben megtalálható.

³ *Ekvivalens-e egymással a tömeg és az energia?* – Fizikai Szemle 53 (2003) 330

⁴ *Special Relativity* – Cambridge University Press, (1978) 114. oldal

ses terében annál nagyobb térenergia van felhalmozva, minél gyorsabban mozog a test, és ez arra vezet, hogy egy töltött testet annál nehezebb gyorsítani, minél nagyobb a sebessége. Hamar szokásossá vált ezt az eredményt úgy fogalmazni, hogy a töltött testek tömege nő a sebességgel.

A XIX. század utolsó éveiben *J. Larmor* és *W. Wien* mondta ki azt a hipotézist, hogy mivel az anyag elektromosan töltött alkotórészekből áll, a tömeg (az elektromosan semleges testek tömege is!) esetleg tisztán az elektromágneses térenergia hatásának a megnyilvánulása (*a tömeg elektromágneses elmélete*).

W. Kaufmann már említett kísérleteit ezek az elképzelések inspirálták. A kísérletek igazolták, hogy az elektronokat annál nehezebb gyorsítani, minél nagyobb a sebességük, és a már megszokott szóhasználattal ezt tömegnövekedésként fogták fel. A tömeg elektromágneses elméletéről azonban hamar kiderült, hogy nem tartható, mert az elektromágneses kölcsönhatás önmagában nem tud stabil anyagot létrehozni, a relativitáselmélet viszont természetes magyarázatot kínál Kaufmann eredményeire. Ez a magyarázat nem a tömegnövekedésen, hanem a Lorentz-transzformáció sajátosságain alapul. Ennek ellenére ma is sokan gondolják úgy, hogy a relativitáselmélet is tömegnövekedésre vezet vissza azt, hogy a gyorsan mozgó elektronokat nehezebb tovább gyorsítani, mint a lassan mozgókat.

Függelék

1) A (6) levezetése a sebességösszeadás képletéből:

Mozogjon az I' inerciarendszer V konstans sebességgel az I inerciarendszerhez képest mondjuk az x -tengely mentén. Figyeljünk meg mindkét inerciarendszerből egy ugyancsak x mentén (változó sebességgel) mozgó objektumot. Az objektum sebessége a két inerciarendszerhez képest természetesen nem lesz ugyanaz. Ha a pályájának egy adott pontjában az objektum I' -höz viszonyított sebessége v' , akkor a relativisztikus sebességösszeadás törvénye szerint az I -hez viszonyított sebességét a

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}} \quad (10)$$

képlet határozza meg. Amikor a v' sebesség egy kis dv' -vel megváltozik, akkor a v megfelelő megváltozása (10) alapján a következő:

$$dv = \frac{1 - \frac{V^2}{c^2}}{\left(1 + \frac{v'V}{c^2}\right)^2} dv'. \quad (11)$$

Gondolatmenetünkben a megfigyelt test a rakéta (vagy az elektron) volt, amely a t pillanatban éppen nyugodott I' -ben. Az I' V sebessége ekkor azonos a rakéta v sebességével, és $v' = 0$. Ebben a speciális esetben (11) valóban (6)-ra redukálódik.

2) A Lorentz-kontrakció képletének származtatása az idődilatacióból:

Haladjon egy vonat nyílegyenes pályán konstans V sebességgel. A vonaton ülők a vonat hosszát a méterrúdjukkal megmérve l_0 -nak találják. A vonat töltéshez viszonyított hosszát a legegyszerűbben úgy lehet meghatározni, hogy egy stopperrel valaki a töltésen állva megméri, mennyi idő alatt halad el mellette a vonat. Ha erre $\Delta\tau$ időt kap, akkor a vonat hossza $l = V\Delta\tau$ -val egyenlő. Az időt itt azért célszerű τ -val jelölni, mert ez annak a valakinek a sajátideje, aki a mérést végzi.

A vonaton ülők mindebből annyit látnak, hogy V sebességgel elsuhan mellettük egy ember stopperrel a kezében, és $\Delta t = l_0/V$ ideig tartózkodik a vonat mellett. Ha a vonaton ülők között van olyan, aki ismeri a relativitáselméletet, az azt is tudja, hogy a töltésen álló ember stopperjén eközben

$$\Delta t \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \frac{l_0 \sqrt{1 - V^2/c^2}}{V}$$

idő telt el. Ez az a $\Delta\tau$, amit a töltésen álló ember stopperje mutat, ezért a töltéshez képest a vonat hossza ennek az időnek a V -szerese:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

3) Miért éppen az

$$\frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

mennyiséget szokás mozgási tömegnek (vagy akár látszólagos tömegnek) tekinteni? Azért, mert ez a kombináció szerepel az impulzus (lendület) relativisztikus képletében:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Ha azonban nem az impulzust, hanem a gyorsulást vennénk alapul, akkor (8) szerint nem ezt, hanem az

$$\frac{m}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}}$$

mennyiséget kellene mozgási (vagy látszólagos) tömegnek nevezni.

Ha a sebességnövekedéssel járó tömegnövekedés ugyanolyan reális folyamat volna, mint a belső energia növelésekor (például melegítéskor) bekövetkező tömegnövekedés, amelyet a $\Delta E = \Delta mc^2$ képlet határoz meg, akkor nem választás kérdése lenne, hogy hogyan függ egy test tömege a sebességétől. A szabad választás lehetősége mutatja, hogy a mozgási tömeg csupán egy *definíció*, amely – mint minden definíció – nem igaz vagy hamis, hanem hasznos vagy haszontalan. Szerintem egyáltalán nem hasznos, mert félrevezető.

NÁGEL FERENC

1931–2005

2005. július 14-én, életének 75. évében, több éven át tartó súlyos betegség után meghalt *Nágel Ferenc*, a Tungstram és a magyar vákuumtechnológia meghatározó fejlesztő egyénisége.

Végzettsége szerint vegyész volt, az ELTE TTK-n szerzett diplomát 1953-ban. Személyében szokatlanul harmonikusan egyesült a széles értelemben vett természettudományos látásmód a magas morális igénnyel és humorral. Mindennek természetes velejárója volt az óriási tárgyi ismeretanyag. Mindazok, akik ismerték és dolgozhattak vele, élvezték és elismerték rendkívül eredeti, kreatív gondolkodásmódját, amely nem nélkülözött bizonyos könnyedséget, eleganciát sem. Miközben felrajzolta a nagy ívű összefüggéseket, külön gondot fordított a gyakorlati részletek finomságaira is. Egyénisége azért alakulhatott ilyené, mert speciális alkati adottságai megfelelő neveléssel találkoztak.

Igazi műszaki ember volt a szó legjobb értelmében. Ez édesapja tudatos irányításának volt köszönhető, aki 5–6 éves korú fiát gyakran magával vitte a győri növényolajgyárba, ahol vezető mérnök volt. Az érdeklődő kisfiú ezzel a valósággal ismerkedett meg először, és ez a tapasztalat meghatározóan formálta a gyakorlatot mindig messzemenően figyelembe vevő szemléletét.

Hallatlan szerencse folytán a gimnáziumban kitűnő matematikatanár osztályfőnöke – akkor még néven nem nevezett – matematika szakos osztályt hozott létre. Ez a nagy pedagógus szaktudása mellett a háború éveiben emberi helytállásával is mércét állított tanítványainak. Ennek következtében Nágel matematikai ismeretei messze meghaladták a vegyészek akkori szokásos szintjét.

Vegyész azért lett, mert elsősorban az anyag érdekelte. Az egyetemen *Cornides István* két éven át oktatta a kémikus hallgatókat *Kísérleti fizika* című előadásában és a hozzá tartozó gyakorlatokban. Már másodéves korában Cornides professzor mellett dolgozott; itt alapozta meg elektronikai ismereteit, valamint itt ismerkedett meg a tömeg-spektrometria tudományterületével. Diplomamunkája is az Intézetben készült.

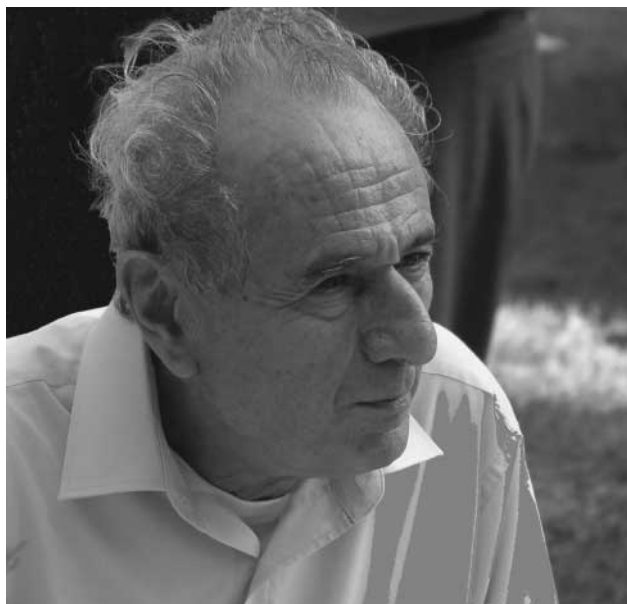
Ilyen felkészültséggel került 1953-ban a Tungstram Fejlesztési Főosztályának Fizikai–Kémiai Laboratóriumába. Kezdetben elektroncsövek katódjainak fejlesztésével foglalkozott, és társaival kifejlesztette és szabadalmaztatta az úgynevezett L-katódot, amely széles körű alkalmazást nyert mikrohullámú elektroncsövekben.

1956 komoly fordulatot hozott életében. 1955–56-ban alakult a Tungstramban a Petőfi-kör mintájára egy vitakör a gyár ügyeinek megbeszélésére. Ebben aktívan vett részt, és Ő képviselte az Izzót a Petőfi-kör rendezte mű-

szaki fejlesztési vitákon is. Ennek következtében a forradalom után csak egy évvel folytathatta fejlesztési munkáját. Ekkorra a Fizikai–Kémiai labor Vákuumfizikai laborrá alakult, és fő feladata a hosszú élettartamú megbízható elektroncsövek hazai megalkotása lett. (Ezek – többek közt – a tenger alatti kábelek postai erősítőibe kerültek.) A fejlesztési munka eredményeként megindulhatott a Philips és Siemens termékeivel egyenértékű, világszínvonalú kissorozatú gyártás. A nágeli siker titka most is abban rejlett, hogy egyszerre tudta kezelni a kémiai–technológiai (pl. vékony drótok tűzi aranyozása), finommechanikai, vákuumtechnikai, elektronikai problémákat. Az elektroncsövek kifutása után a labor fő feladata az elektronikus vákuummérő-család kifejlesztése lett. Az Ő vezetésével készültek el a Tungstram méltán híres Piráni, Penning-, ionizációs vákuummérői.

Az 1960-as évek elején másodállásban elvállalta a Műegyetem Villamosművek Tanszékén készítenő nagykapacitású analóg számítógép tervezésének és kivitelezésének vezetését. A megalkotott rendszer csúcskategóriát képviselt azokban az években, és jelentős szerepet kapott az oktatásban, a hálózati tranziensek modellezésében, és több fontos ipari kutatásban. További 10 évig dolgozott a Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Tanszéken *Csernátorny Hoffer* professzor mellett. Itt született meg – többek között – az analóg számítógép egységeinek felhasználásával az alacsonyfrekvenciás tg(δ)-mérő szabadalom és készülék, amely világújdonságnak számítot.

Közben a Tungstramban a nagynyomású kisülőlámpák hazai bevezetése folyt. A fejlesztés a mozivetítők nagynyomású xenon vetítőlámpáival kezdődött. Sok, az akkori technológia élvonalába tartozó problémát kellett megoldani, mint például a 2000 °C-on működő wolfram anódtömb gáztalanítását, getterezését. A eredmény a nemzetközi piacon is jól értékesíthető termék lett. Ezek után a fémhalogén kisülőlámpák fejlesztése következett. Először az akkor uralkodó háromadalékos (nátrium-tallium-indium-jodid) lámpákat hozták létre, majd az Osram után a piacon másodikként megjelentek a kitűnő színvisszaadású ritkaföldfém-adalékot tartalmazó típusokkal is. Végezetül a nagynyomású nátriumlámpák fejlesztése és gyártásba vitele következett. A kisülőlámpák konstrukciója és gyártástechnológiája alapjaiban különbözik az izzólámpákétól. Ő ismerte fel, hogy alapjaiban új megközelítés szükséges, és elindította a nagytisztaságú, úgynevezett kesztyűsboxos technika bevezetését. Akkor már nemzetközi kapcsolatokkal rendelkezett, és ezt felhasználva szervezte azt a nemzetközi csapatot, amely a nátri-



umlámpa égőtestek automatizált nagytisztaságú gyártását megvalósította. Ennek eredménye az úgynevezett H-box, amely a mai napig mérföldköve a nagynyomású kisülőlámpák gyártástechnológiájának.

Az 1980-as évek elején kivált a Vákuumfizikai Laborból és kinevezték a Fényforrás-fejlesztési Főosztály Kémiai Laboratóriumának vezetőjévé. A Tungstram új vezetése lehetővé tette számára, hogy nyugati nagy konferenciákon szerepelhessen. Valódi örömmel nyugtázta, hogy a második konferencia után a szakterület legjobb nemzetközi nagyjai egyenrangú félnek tekintették és bizalmukba fogadták. Ezzel párhuzamosan egy csoport fiatal szakember is csatlakozott a Laboratóriumhoz; megalakult a „Nágeliskola”. Az Electrochemical Society 1988-as ülésén már 26 előadásból 8-at Nágel és fiatal doktoranduszai tartottak.

Utolsó alkotói periódusában ismét visszatért a Tungstramhoz – akkor már a General Electric fényforrás üzletágához –, mint tudományos tanácsadó. A GE ipari straté-

giájában ekkor kapott ismét nagyobb hangsúlyt a hosszabb távú ipari innováció. Több évtizedes tapasztalata, kreativitása meghatározó szerepet játszott a hosszú távú fejlesztések technológiai stratégiájának megalkotásában.

1999 végén kezdődött az autók fényszóróiban használatos nagy intenzitású kisülőlámpák konstrukciójának és gyártástechnológiájának megalkotása. Nágel kulcsszerepet játszott a legkritikusabb technológiai folyamatlépések kidolgozásában. Az ő és vállalkozása által épített laboratóriumi vákuumtechnikai berendezés szolgált alapul a nagykapacitású magas technológiai gyártósor tervezéséhez és kivitelezéséhez. A rá jellemző módon soha nem csak a szűkebb szakmai problémát látta: mindig a nagyobb összefüggésekben is gondolkodott, így a műszaki elképzelések hosszabb távú ipar és piaci-gazdasági hatását is látta és láttatta a vele együtt dolgozó fiatalabb munkatársakkal. Számos úttörő gondolatát, szellemiségét a mai napig viszik tovább, akiknek módjukban volt vele együtt dolgozni.

Pályafutása alatt több mint 40 szabadalma született. Közülük 20 konkrét alkalmazást is nyert különböző termékekben, gyártási technológiákban. Több tanulmányt és egyetemi jegyzetet írt a Műegyetemen folyó speciális kurzusokhoz. Utolsó éveiben hozzálátott egy speciális vákuumtechnika könyv megírásához, amelynek sajnos csak az első fele készült el. Befejezése az utódokra vár.

A teljesség igényét nem csak szakmai pályafutása példázza. Amilyen intenzitással és humorral szakmai kérdésekről tudott vitázni („ez a véleményem és ezt osztom is”), ugyanolyan lelkesedéssel és mélységgel érdeklődött a kultúra minden ága iránt is. Humán műveltsége családi háttere természetes közegéből magától adódott. Barátságot tartott a magyar irodalmi és művészeti élet több neves személyiségével. Rendkívül fontos volt számára a zene, ezen belül a kamaraműfajok és a régi zene. Betegsége idején is ez adott számára némi vigaszt. Szeretett élni. Utolsó szavai szerint: még sok dolga lett volna.

Holló Sándor, műszaki igazgató

Ugrósdly László, fizikus
GE Tungstram

HÍREK – ESEMÉNYEK

BODÓ ZALÁN EMLÉKÜLÉS

Már 15 éve eltávozott *Bodó Zalán*, akkor utolsó munkájával együtt [1] megemlékezés jelent meg a *Fizikai Szemle*-ben [2]. 2005. december 14-én az ELFT Vákuumfizikai Szakcsoportja, az MTA Műszaki Fizikai Anyagtudományi Kutatóintézete, valamint az MTA Elektronikus Eszközök és Technológiák Bizottsága közös Bodó Zalán Emlékülést tartott. Ennek időszerűségét több esemény indokolta. Bodó Zalán 1946 óta *Szigeti György* közvetlen munkatársa volt, 2005 Szigeti-émlékév. 2006 az MTA Műszaki

Fizikai Kutatóintézet (MFKI) alapításának 50. évfordulója, Bodó Zalán elhunytáig itt dolgozott. 1951. évi diffúz optikai munkáját [3] a szakirodalom még 2005-ben is idézte.

Az 1990. évi megemlékezést most újabb adatokkal egészítem ki. 1948 óta haláláig munkatársak és barátok voltunk. Bodó Zalán munkái megtalálhatók 1974-ig az MFKI bibliográfiájában, majd 1977–95-ig az MFKI Évkönyvekben. Mellőzöm Bodó Zalán életrajzát [1]. Az Emlékülésem optikai eredményeiről beszéltem.

1946-ban *Bay Zoltán* vette fel az Egyesült Izzó Kutatólaboratóriumába. Részt vett a Hold-radar kísérletekben, *Pócza Jenő*vel és *Takács Lajossal* (Neumann-díjas, Bell és Boeing tanácsadó, Cleveland University professzora) együtt. A Hold-radar kísérletek befejezése után Szigeti György osztályára került, ahol *Nagy Elemérrel* és *Makai Endrével* együtt a fénycsövekben alkalmazott halofoszfat fényporokkal foglalkozott. Első közleménye a *Journal of the Optical Society of America*-ban jelent meg [4]. 1952-ben az ELFT Bródy-díját nyerte el.

1950-ben a Tungstram Kutatólaboratóriumát a Távközlési Kutató Intézet (TKI) vette át. Az újpesti TKI2 igazgatója Szigeti György lett. A világszínvonalú alap kutatás a fénycsőfejlesztést támogatta, mely néhány év alatt hatalmas méretű gyártássá fejlődött. A világító rétegek méretezése szükségessé tette a por alakú mikrokristályok optikai állandóinak meghatározását, mérését. Bodó Zalán fő műve a diffúz optika kifejlesztése volt. Az addig használatos modellek helyett a diffúz rétegek reflexiójának számításánál ő vezette be a szemcseméret-paramétert. Modelljét kísérletekkel igazolta. 1950-ben igen nehéz körülmények mellett betanított laboránsnő végezte a fényporok frakció-nállett ülepítését és befőttes üvegekben állított elő homogén szemcseméretű rétegeket. Ezek szemcseeloszlását okulárhálós mikroszkóppal határozta meg. Bodó Zalán kísérleteit porrá tört színes üveggel is elvégezte, melynek optikai állandóit előtte megmérte. A kísérletek igazolták modelljét. Eredményeit 1951-ben az *Acta Physica Hungarica*-ban publikálta [3], melyre az akkori elzártság ellenére a nemzetközi kutatás az USA-tól Moszkváig felfigyelt. Azóta is folyamatosan hivatkoznak ezen munkájára, mely a Szovjetunióban iskolát teremtett [5].

Bodó Zalán módszerével meghatározta a fényporok abszorpciós tényezőjét [6], melyet később *Hangos István*-nal közös munkáiban a rétegek méretezésénél alkalmazott [7]. A Tudományos Minősítő Bizottság (TMB) megalakulása után munkásságuk alapján többeknek adományozott tudományos fokozatot. Bodó Zalán is benyújtotta kérését eredményei alapján, melyet azonban a TMB nem teljesített.

A fényporok fizikája terén Bodó Zalán számos eredményből még egyet emelek ki: fényporok kvantumhatásfokának kaloriméteres mérését. Az abszorbeált fotonok egy része sugárzásmentes átmenettel rekombinálódik, ami melegíti az anyagot. Bodó 60 darab Cu-konstantán párt forrasztott össze [8]. A kvantumhatásfok a fénypor fizikai paramétere és legfontosabb minőségi jellemzője. A Tungstram-fénycsőgyártás évtizedekig alkalmazta Bodó módszerét. Később a hazai TV-fényporok kifejlesztésénél a TKI-ban Bodó műszerének továbbfejlesztett változatát alkalmaztuk.

Bodó Zalán ezen fő eredményeit még a TKI2-ben érte el. Később az MFKI-ban ZnS elektrolumineszcenciájával is foglalkozott 1961-ig.

Bodó Zalán vezette be az MFKI-ban a számítástechnikát egy HP kis számítógéppel, majd kutatási szintre fejlesztette a KFKI TPA számítógépével.

Az ellipszometria hazánkban *Ádám Jánossal* indult 1965-ben, a félvezető kutatás-fejlesztéssel, *Giber János* kezdeményezésére. 1971-től még ellipszométeres táblá-

zatunkat [9] használták. 1980-ban Bodó Zalán már kidolgozta a kísérletek számítógépes kiértékelését és velem együtt bekapcsolódott *Barna Péter* Al-vékonyréteg kutatásaiba. Elhunytáig együtt dolgoztunk ezen témában. Bodó Zalán felismerése volt, hogy az irodalomban az Al optikai állandóinak nagymértékű szórását az Al felületén a természetes, részben hidratált oxidrétegek különbözősége okozza. Ezután kidolgoztuk az Al optikai állandóinak ellipszométeres meghatározását, az oxidréteg figyelembevételével. A méréseket *Ádám János* végezte ellipszométerével. Az eredményeket Bodó Zalán, *Ádám János*, *Barna Péter*, *Gergely György* és *P. Croce* (Université Orsay) közös 5 közleménye ismertette [1]. Bodó Zalán utolsó munkája új módszere volt [2].

Bodó Zalán félvezető-kutatásait *Beleznay Ferenc* ismertette az emlékülésen. A félvezetők terén Bodó Zalán úttörő munkát végzett hazánkban. Ezt megelőzte *Shockley* könyvének hazai kiadása Bodó Zalán lektorálásával. Ő ismertette elsőként a hazai irodalomban a tranzisztort. Ő vezette be az egyetemi oktatásba (Eötvös Egyetem, Műegyetem) a félvezető-fizikát. Legfontosabb eredményei: a hazai Ge egykristály és tranzisztor megvalósítása, melyért Szigeti Györggyel és *Szép Ivánnal* együtt Kossuth-díjat kaptak. Töltésseloszlás félvezetőkben munkájával [10] a fizikai tudományok doktora fokozatot nyerte el.

Az MFKI-ban Bodó Zalán a félvezető alap kutatások terén is jelentős eredményeket ért el.

Beleznay Ferenc előadásában a fonon Ge szél kutatásait emelte ki, melyekről *Rösner Bélával* és *Sebestyén Tiborral* 4 közös közleményük [2] jelent meg. Részt vett a heteroátmenetek kutatásaiban.

1962-ben pályázat útján a nyugalomba vonuló *Gyulay Zoltán* akadémikus tanszékének vezetését vette át, 1966-ig. Itteni eredményeit *Hartmann Ervin* ismertette megemlékezésében. Bodó Zalán munkáját elsősorban az oktatásnak szentelte. A Tankönyvkiadónál 1963–65 között négy tankönyve jelent meg. Sajtó alá rendezte *Selényi Pál* munkáinak összkiadását [11]. A félvezető alap kutatások terén *Zawadowski Alfréd*-dal közös munkáját emelte ki [12]. 1966-ban visszatért az MFKI-ba.

1977-től elhunytáig együtt dolgoztam vele. 1977-ben készült el közös könyvfejezetünk [13] a szabad felületekről.

A félnapos emlékülés második része a hazai ellipszometria történetével foglalkozott.

Ádám János: Az első hazai ellipszométer megépítése és kutatási eredményei, Lohner Tivadar: Az ellipszometria 25 éve a Csillebércen címmel tartottak előadást, majd ő ismertette a távollévő *Fried Miklós: Az ellipszometria jelene és jövője* munkáját.

Bodó Zalánt mindenki szerette és tisztelte az MFKI-ban.

Valamely tudományos munka nemzetközi hatását számszerűen tükrözi a Citation Indexben a hivatkozások száma és éve is. Maradandó tudományos értékről beszélhetünk, ha legalább 25 évig folyamatosan hivatkoznak a közleményre. Ez 54 év folyamán teljesült Bodó Zalán 1951. évi diffúz optikai munkájánál. Bodó Zalán kivívta helyét a diffúz optika történetében és egyike a nagy magyar fizikusoknak is.

Gergely György
MTA MFA

Irodalom

1. BODÓ Z. – Fizikai Szemle 40(1990) 333
2. GERGELY GY. – Fizikai Szemle 40(1990) 335
3. Z. BODÓ – Acta Phys. Hung. 1 (1951) 135
4. Z. BODÓ – J. Opt. Soc. Am. 38(1948) 815
5. GERGELY GY. – Magyar Fizikai Folyóirat 6 (1958) 1
6. Z. BODÓ – Acta Phys. Hung. 2(1952) 67
7. Z. BODÓ, I. HANGOS – Acta Phys. Hung. 3 (1953) 155 és Acta Phys. Hung. 5(1955) 295
8. Z. BODÓ Acta Phys. Hung. 3 (1953) 23
9. G. GERGELY, G. FORGÁCS, B. SZÚCS, D. VAN PHOUC: *Ellipsometric Tables of the Si-SiO₂ System from the Hg and HeNe Spectral Lines* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971.
10. Z. BODÓ: *MTA doktori értekezés* (1957) és Acta Phys. Hung. 11 (1960)
11. Z. BODÓ (szerk.): *P. Selényi Gesammelte Arbeiten* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969.
12. Z. BODÓ, GY. PÁSZTOR, M. SZILÁGYI, A. ZAWADOWSKI – Acta Phys. Hung. 15 (1963) 275
13. BODÓ Z., GERGELY GY.: *Szilárdtestkutatások új eredményei 5.* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979.

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Kitüntetések

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöksége *Marx György-émlékéremmel* tüntette ki BERÉNYI DÉNEST, a *Fizikai Szemle* 2005 végén leköszönt főszerkesztőjét, valamint TURINÉ

FRANK ZSUZSÁT, aki több mint fél évszázadon át szerkesztette a *Fizikai Szemlét*. Kitüntetett kollégáinknak a lap készítői és olvasótáborának nevében is szívből gratulálunk.

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Új akadémiai doktorok

2005. december 13-án *Dobozy Attila* akadémikus, a Doktori Tanács elnöke átadta az MTA doktora oklevelet a 2005-ben odaitélt címekért. A fizikai tudományok

területén három új akadémiai doktor, *Donkó Zoltán*, *Fried Miklós Sándor* és *Lábár János László* vehette át az oklevelet.

Nemzetközi Gábor Dénes-díj 2006 fiatal kutatók számára

A Nemzetközi Gábor Dénes-díj 2006 kiemelkedő teljesítményű fiatal kutatók (egy magyar és egy külföldi állampolgár) elismerését tűzte ki célul. Mivel a Magyar Tudományos Akadémia egyik fontos feladatának tartja a tudományos

utánpótlás biztosítását, az értékek megbecsülését, elvállalta a díj védnökségét. Ezért a NOVOFER Alapítvány által fogalmazott pályázati kiírás az MTA honlapján is megjelenik. A pályázatok beadási határideje: 2006. április 30.

Székfoglaló előadások

Az Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Osztálya szervezésében két székfoglaló előadás hangzott el 2006. február 8-án 13 órakor és 14 órakor az Akadémia Roosevelt téri székházában.

Horváth Zalán, az MTA rendes tagja: *Kiterjedt objektumok és szerepük a térelméletben*,
Rácz Zoltán, az MTA levelező tagja: *Liesegang jelenség: 110 év fejleményei*

HÍREK ITTHONRÓL

Az atomoktól a csillagokig

Idén is folytatódik az ELTE TTK Fizikai Intézetében szervezett előadássorozat, melynek címe: *Az atomoktól a csillagokig*.

Bővebb információ a <http://www.atomcsill.elte.hu> címen található, ahol a korábbi előadások anyaga is letehető. Az előadások látogatása ingyenes.

Tudományos ismeretterjesztő film a gravitációról

Elkészült az *Einstein befejezetlen szimfóniája* című film, amely gravitáció kutatásának eredményeit ismerteti *Einstein* úttörő munkásságától kezdve napjaink legújabb irányzatairól. A film rendezője *Erdős Pál*, tudományos szakértője *Rácz István*, a KFKI RMKI tudományos főmun-

katársa. A film ősbemutatójára zárt körben az RMKI Tudományos Tanácsa előtt került sor 2006. február 27-én. A tervek szerint a film DVD-változata is elkészül a közeljövőben az OTKA támogatásával, és elérhető lesz az érdeklődő oktatási intézmények és középiskolák számára.

Változócsillagászati találkozó

2006. február 18-án az óbudai Polaris Csillagvizsgálóban ismét találkoztak a változócsillagászat iránt érdeklődő kutatók és amatőr csillagászok. Az előadások témái kö-

zött szerepeltek a változócsillagokkal kapcsolatos újdonságok, illetve néhány fontos változócsillagászati kutatóhely bemutatása.

Előadás-sorozat az óbudai Polaris Csillagvizsgálóban

Előadásokat keddenként tartják, 18 órai kezdettel. Belépődíj 400 Ft, diákoknak és nyugdíjasoknak 250 Ft. Az MCSE tagjai számára a részvétel díjtalan. Derült idő esetén az előadásokat távcsöves bemutató követi. A program:

Február 7.: Oda a dicsőség, avagy az üstökösök halála (*Sárnecky Krisztián*)

Február 14.: MÉRJÜK MEG AZ UNIVERZUMOT! (*Nyerges Gyula*)

Február 21.: Csillagokkal a Föld körül (*Kiss László*)

Február 28.: Bay Zoltán Hold-radar kísérlete (*Már András Péter*)

Március 7.: A kráterek új atlasza (*Hargítai Henrik*)

Március 14.: Rádióégbolt, optikai égbolt (*Frey Sándor*)

Március 21.: Holdak a Naprendszerben (*Illés Erzsébet*)

Március 28.: Készüljünk a napfogyatkozásra! (*Mizser Attila*)

Április 4.: A csillagok élete (*Kolláth Zoltán*)

Április 11.: Csillagvizsgáló a Svábhegyen (*Bartha Lajos*)

Április 18.: A naptevékenység Galileitől a SOHO űrobservatóriumig (*Petrovay Kristóf*)

Április 25.: Mi mindenre jők a cefeidák!? (*Szabados László*)

Egy fiatal változócsillag kitörésének váratlan vége

A V1647 Orionis nevű fiatal csillag két évvel ezelőtt hirtelen kifényesedett. A csillag kitörés utáni viselkedését az MTA Csillagászati Kutatóintézetének munkatársai is nyomon követték az optikai és az infravörös tartományban. A fotometriai vizsgálatok egyik célja annak eldöntése volt, hogy a V1647 Ori a kifényesedés és az elhalványodás üteme alapján a kitörést produkáló fiatal csillagok

melyik típusába tartozik a lehetséges kettő közül. Ám a csillag 2005 őszén váratlan gyorsasággal elhalványodott (lásd a *címképet*), amit ilyen csillagoknál eddig soha nem tapasztaltak. A szokatlan jelenség megfigyelését a Nemzetközi Csillagászati Unió változócsillagászati gyorskiadványának (*Information Bulletin on Variable Stars*) 5661. számában tették közzé.

Részecskefizikai diákműhely

2006 márciusában ismét megrendezésre kerül a *Részecskefizikai diákműhely* nemzetközi eseménysorozat (a 2005. évi eseményekről a *Fizikai Szemle* 2005. augusztusi számában olvashattunk). Magyarországon ismét három helyszínen, március 6-án Székesfehérváron (kapcsolattartó *Horváth Árpád*, horvath.arpad@szgti.bmf.hu), már-

cius 13-án Debrecenben (kapcsolattartó *Trócsányi Zoltán*, Zoltan.Trocsanyi@cern.ch) és március 20-án Budapesten (kapcsolattartó *Jancsó Gábor*, jancso@rmki.kfki.hu) lesz középiskolásoknak szánt részecskefizikai műhely.

Kérjük, az érdeklődő tanárok, diákok a megadott címen vegyék fel a kapcsolatot a helyi szervezőkkel.

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@mtsz.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk 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 egyszámlán.

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

HU ISSN 0015-3257

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Új szuperszámítógép a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban

A Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban 2005. november 30-án állt üzembe a legújabb szuperszámítógép, amely teljes kapacitását kvantum-szindinamikai (QCD) számításokra fogja fordítani. Az üzembe állítással ünneplik meg a 25. évfordulóját annak az úttörő cikknek, amelyben 1980-ban *Michael Creutz* elsőként végzett

„rács-QCD”-számításokat a Monte Carlo-módszer segítségével. Az USQDOC-nak elnevezett számítógép sebessége 10 teraflop, a gépet a Brookhaven Nemzeti Laboratórium, a Columbia Egyetem, az IBM, valamint a brit UKQCD Kollaboráció és a japán RIKEN kutatói közösen tervezték és hozták létre. (www.bnl.org)

Új spallációs neutronforrás az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban

Az újév nagy ajándéka a fizikusok számára az ORNL spallációs neutronforrása (SNS, Spallation Neutron Source), amely hétéves tervező és kivitelező munka eredményeképpen 2006-ban kerül befejezésre és átadásra. Az új neutronforrás az anyagvizsgálatok számára minden eddiginél nagyobb energiájú neutronnyalábot szolgáltat. Egy lineáris gyorsító 1 GeV energiára gyorsít fel protonokat, amelyek a céltárgyba ütközve neutronokat keltenek. A gyorsító által felhasznált ener-

gia 1,4 megawatt. A becsült éves villanyszámla körülbelül 10 millió dollár! A közel 300 méter hosszú gyorsító kétharmad részét a folyékony hélium hőmérsékletére (2 K) kell lehűteni. Az új berendezés elsőként használ folyékony higanyt céltárgyként, mivel így a target se könnyebben megoldható. Az impulzusüzemben működő berendezés másodpercenként 60, egymilliomod másodperc hosszúságú protonimpulzusokkal működik majd. (www.ornl.gov)

Nanoskálán másképpen fénylik az arany

Az Argonne Nemzeti Laboratórium kutató azt találták, hogy az arany „másképpen” fénylik nanoskálán, és ez a felfedezés a számítógépek számára új optikai chipek kifejlesztését teszi lehetővé. A nanoskála a 10^{-9} m méretek tartománya, ahol az anyag tulajdonságai jelentősen különböznek a makroszkopikus méreteknél megszokottaktól. A kutatók aranyból készült nanorudakban tanulmányozták a fotolumineszcencia jelenségét. A rudacsák átmérője 20 nm, hossza 70–300 nm volt. A kísérletek azt mutatták, hogy kisugárzott fény hullámhosszát szabályoz-

ni lehetett a nanorudacsák méretének változtatásával. Ez a körülmény lehetővé teszi, hogy a rudacsákakat optikai chipekben fényforrásként használják fel információ továbbítására. A rúd alak igen fontos, mivel az határozza meg a fénykibocsátásért felelő kollektív gerjesztés energiáját. Különböző hosszúságú rudakkal különböző hullámhosszúságú fényt lehetett kelteni, és a kísérletek szerint a rudak a közeli infravörös tartományban erősen elnyelik a fényt. A vizsgálatokban ultragyors titán–zafír-lézert használtak 800 nm hullámhosszon. (www.anl.gov)

Einstein „legnagyobb tévedése” a legújabb szupernóva-kutatások fényében

A távoli Univerzumban felrobbanó csillagok folyamatban lévő kiterjedt vizsgálata során az asztrofizikusok arra az eredményre jutottak, hogy a „sötét energia” hatása, amely a Világegyetem tágulását felgyorsítja, 10% pontossággal megegyezik *Einstein* kozmológiai állandójának hatásával. A kozmológusok szerint ezzel nagy előrelépés történt az Univerzum e titokzatos tulajdonságának megértése terén.

A sötét anyag tanulmányozásának legjobb módja a távoli szupernóvák vizsgálata, amely a Supernova Legacy Survey (SNLS) program keretében történik, amelynél mintegy 700 szupernóva megfigyelésével az Univerzum tágulásának folyamatát vizsgálják. Az eredmények azt

mutatják, hogy a Világegyetem tágulása egyre inkább gyorsul. Kulcsfontosságú azonban, hogy Einstein 1917-ben bevezetett kozmológiai állandója segítségével az új szupernóvaadatok meglepően jól magyarázhatók. Az SNLS nemzetközi kutatási program több óriáštávcső adataira támaszkodik, köztük a hawaii Mauna Kea kialudt vulkán tetejére telepített Canada–France–Hawaii Telescope, a Keck-teleszkóp és a Gemini North teleszkóp, a chilei Andokban a Cerro Pachón hegyen lévő Gemini South teleszkóp, valamint az Európai Déli Observatórium (ESO) chilei Paranal Observatóriumában a Very Large Telescope (VLT) legújabb adataira. (www.caltech.edu)

Frei Zsolt, Patkós András: INFLÁCIÓS KOZMOLÓGIA

Typotex Kiadó, Budapest, 2005

Az első olyan szakkönyvet tartjuk a kezünkben, amely a kozmológia igazi tudományáról számol be olvasóinak magyar nyelven. Szóval: egyetemi tankönyv, az általános relativitáselmélet kozmológiai vonatkozásait és a kozmosz (a Világmindenség) szerkezetének s tartalmának a tudományos vizsgálati módszereit foglalja össze, a legutóbbi körülbelül 25 év kutatási eredményeit véve alapul. Szemben például *Timothy Ferris: A Világmindenség (Mai kozmológiai elméletek)* című könyvével, amelyet szintén a Typotex Kiadó jelentetett meg magyarul 2005-ben, ebben a műben a tudományos eljárások formanyelve szerepel. Ezért elsősorban azok élvezhetik, akiknek nem idegen ez a kvantitatív vizsgálati eljárás. (Ferris említett könyve persze jól kiegészíti ezt a tanulmányt.) A kozmológia a 20. század végén komolyan kezdte venni azt, hogy az általános relativitáselméleti leírásban az Univerzum fejlődéstörténete egy felfúvódási időszakon mehetett keresztül. Ezzel a feltevéssel jobban lehetett megközelíteni azokat az egyébként is szűk tapasztalati tényeket, amelyekre a kozmológia támaszkodhatott. A fizikai (általános relativitáselméleti) alapok felidézése után (melyekről más, szerencsére magyar nyelven is hozzáférhető alapozó tankönyvek is vannak) a szerzők bemutatják a modern vizsgálati alapok és eljárások főbb irányait. Elsősorban a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás finomságainak a vizsgálata kerül terítékre, mely 1965, vagyis *Arno Penzias* és *Robert Wilson* Nobel-díjjal jutalmazott felfedezése óta az ősröbbség egyik legfontosabb tapasztalati bizonyítéka. Azóta, a például 1989-ben felbocsátott *Cosmic Background Explorer* (COBE) űrszonda

da mérései rendkívüli mértékben tártak fel érdekes vonásokat a háttérsugárzásban. A következő tárgykör az Ia típusú szupernóva-kitörésekre alapozott távolságmérési eljárás vizsgálata, amelynek célja, hogy a galaxisok térbeli eloszlását tapasztalati skálára lehessen rendezni. Ezzel érünk el az Univerzum nagyléptékű szerkezetének vizsgálatához. Az igazán nagyléptékű szerkezet problémája abban rejlik, hogy a fénylő anyag mennyiségének felbecslése nem vezet elegendő – ismert tulajdonságú – anyaghoz, nagyságrendekkel kevesebb anyag látható, mint amennyi a gravitáció tanúsága szerint lehet az Univerzumban. Ebből kifolyólag kell léteznie valamilyen „sötét” anyagnak, ami gravitációs úton érzékelhető, optikailag azonban nem látszik. Ennek a „sötét anyag”-nak a mibenlétéről vallott nézetek és részecskefizikai jellegű próbálkozások, vizsgálatok áttekintése a könyv további fejezeteinek célja.

Mint látható, a kötet az utóbbi, mondjuk, negyedszázadban bekövetkezett komoly kozmológiai „sorsforduló” részletes szakmai elemzése. Mint ilyen, a magyar nyelvű szakirodalomban egyedülálló (legfeljebb rövid cikkek érintették a témát). Ezért különös örömmel regisztráljuk a mű megjelenését. A szerzőknek, akik a témakörrel egyetemi előadásokat is tartanak, s a tulajdonképpeni kutatásokkal nemzetközi mezőnyben is foglalkoznak, gratulálunk. A Kiadónak is elismerés jár a vállalkozásáért, hogy ezt az érdekes témát – amelyet bizonyára nem mindenki követ ilyen részletességgel és mélységekben – tankönyv formájában megjelentette.

Abonyi Iván

ATOMMAGFIZIKA

Szerkesztette Fényes Tibor, Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2005

A magyar nyelvű természettudományos szakirodalom régi, évtizedes hiányt most méltó és színvonalas módon bepótoló könyvét tartja a kezében az, aki a Kossuth Egyetemi Kiadó gondozásában 2005-ben megjelent *Atommagfizika* című művel ismerkedik. Ez a könyv évtizedek óta az első olyan magfizikával foglalkozó magyar nyelvű monográfia, amely magas szakmai színvonalon, az alacsony és középenergiájú magfizika jelenségeinek, az ezen a területen kialakult és letisztult ismereteknek, tudásnak áttekintő összefoglalását tűzi ki célul, és azt sikeresen hajtja is végre.

Az *Atommagfizika* szerkesztett könyv, amelynek szerzői a kiváló debreceni magfizikai tudományos iskola tagjai. A többi, az általuk írt területen hivatott, kiváló szerző között

azonban meghatározó szerepet játszik a szerkesztő-társ-szerző, *Fényes Tibor* professzor. Az ő szerepe nemcsak abban döntő, hogy a könyv meghatározó, mintegy negyötöd részének személyében is ő a szerzője, hanem abban is, hogy a mű teljes felépítése, szerkezete, logikája és a fejezetek egységes stílusa egyértelműen őt dicséri.

Az *Atommagfizika* minden olyan területtel foglalkozik, amely az alacsony és középenergiájú magfizika jelenségköréhez tartozik, tehát olyan energiákig, amikor a folyamatokban még nem válik uralkodóvá a részecskekeltés. A magfizikának ezt az óriási, mind kísérleti, mind elméleti szempontból szerteágazó területét a könyv szerkezetileg logikusan, az egyes területek kö-

zötti arányokra példás fegyelemmel figyelve, az egyes témák jelentőségére tekintettel érdemben azonos mélységben ismerteti.

A könyv tíz fejezetből és a függelékéből áll. A magfizika tárgyát, rövid történetét és a magfizikának a többi tudományterülethez viszonyított jelentőségét bemutató bevezetést az atommagok alap- és gerjesztett állapotai alapvető tulajdonságainak ismertetése követi. A harmadik fejezet a magerőkkel és a nukleon–nukleon kölcsönhatásokkal foglalkozik. Ezt a fejezetet két, a magfizika művelésében megkerülhetetlen technikainak tekinthető rész követi: az első a magfizikai mérőberendezésekkel és mérési módszerekkel, míg a második a magfizikai gyakorlatban alkalmazott részecskenyalábokat előállító gyorsító-berendezésekkel foglalkozik. A következő három fejezet az atommagok szerkezetének megértésével kapcsolatos erőfeszítéseket, az atommagok bomlásait és a magreakciók témakörét tárgyalja.

A könyv utolsó előtti fejezete a magfizikai ismeretek és módszerek alkalmazásait ismerteti. Ez a rész kitér az atomreaktorok működésével kapcsolatos ismeretekre, a nukleáris fegyverek elveire, a magfizikai alapokon végrehajtott elemanalízis módszereire, az ipari és mezőgazdasági alkalmazásokra, a nukleáris kormeghatározási eljárásokra és azokra a magfizikai indítatású diagnosztikai és terápiás módszerekre, amelyeket a modern orvostudomány alkalmaz. A fejezeten belül külön alfejezet foglalkozik a nukleáris asztrofizikával, amely a mai élvonalbeli tudomány egyik, több más szakterülethez is tartozó páratlanul izgalmas kérdéscsoportját jelenti. A könyvet a magfizika lehetséges fejlődési irányairól szóló fejezet zárja. Ez a rész lényegében összefoglalja azokat a nyitott kérdéseket, amelyek a mai magfizika legfontosabb kutatási területeit jelentik.

Az *Atommagfizika* minden egyes fejezetéhez külön tartozik irodalomjegyzék. Az irodalom ismertetését a szerző két részre bontja: az összefoglaló munkákra és a hivatkozásokra. Ez a módszer mind abban az elemében, hogy az egyes fejezetekre külön-külön állítja össze a többi szerző munkáját, mind abban az elemében, hogy mindenütt külön veszi az összefoglaló tanulmányokat, jól segíti akár az előzményeket jobban megismerni kívánó, akár a mélyebb ismeretekre törekvő olvasót.

A könyv minden fejezetéhez feladatok is tartoznak, amelyek megoldásai a *Függelék*ben megtalálhatók. A leg-

többször jól kiválasztott feladatok részben segítik az egyes témakörök mélyebb megértését, részben jó eszköze annak, hogy az *Atommagfizika* könyvet az egyetemi oktatásban alkalmazzák.

Az *Atommagfizika* könyv formai kivitele megfelel a hasonló szakkönyvektől elvárható követelményeknek. Talán csak a könyv végére került, összesen négy színes ábra szövegtől való elválasztása tűnik a mai technikai körülmények között kicsit idejétmúltnak.

Külön kell szólni a könyv nyelvezetéről. Egyrésztől megállapítható, hogy a nyelvezet mindenütt könnyen érthető, olvasmányos, kerüli a bonyolult mondatstruktúrákat. Másrésztől külön erénye a könyvnek, hogy komoly erőfeszítést tesz a magfizikában használatos magyar szaknyelv megújítására és fejlesztésére. A szöveg mindenütt kerüli az idegen eredetű szakkifejezések használatát és számos helyen mutatja meg, hogy milyen, az értelmet már önmagában is megmutató jó magyar szakkifejezéseket lehet találni számos olyan területen, ahol a magfizikusi szakzsargon eddig idegen szavak használatát fogadta el. Megítélésem szerint a könyv ezen a területen is maradandót alkotott és más tudományos szakterületeknek követendő példát mutat.

Összefoglalva: Fényes Tibor professzor *Atommagfizika* című könyve a magfizikai ismeretekre vonatkozó tudományos monográfiák – magyar nyelven hiánypótló, nemzetközi összehasonlításban is eredeti – kiemelkedő alkotása. A szerkezet kialakításánál az ismeretterületek teljességére való törekvés, a minden szempontból jól eltalált arányok, a kitűzött célokhoz kiválóan illeszkedő tudományos mélység, a témák kifejtésének módszere, a könyv fejezeteinek irodalomjegyzéke, az egyes témákhoz illeszkedő gyakorló feladatok, a könnyű, érthető olvashatóság, az innovatív szaknyelvi fejlesztések mind olyan mozzanatai a könyvnek, amely alkalmassá teszi arra, hogy magas színvonalú tankönyve legyen a jövő szakembereinek és egyúttal jól használható kézikönyvévé váljon a mai magfizikusoknak, vagy magfizikai ismereteket felhasználó szakembereknek. Fényes Tibor professzor monográfiája kiválóan alkalmas mind egyetemi tankönyvnek, doktori kurzusok segédanyagának, mind színvonalas szakmai kézikönyvnek. A könyvet minden magfizikai témával foglalkozó, vagy az iránt érdeklődő szakembernek, egyetemi hallgatónak, tanárnak, tanárjelöltnek jó lelkiismerettel, a legmelegebben ajánlom.

Kiss Ádám

EINSTEIN ÉS A MAGYAROK

Összeállította Gazda István, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2004, 734 o.

Ismeretes, hogy 2005 a fizika éve volt. Ugyancsak 2005-ben volt százészentűdős a speciális relativitáselmélet. 2005 így *Einstein* éve is. Ennek az évnek a kezdetére jelent meg az a nagy akadémiai monográfia, amelyet a Magyar Tudománytörténeti Intézetben állítottak össze, s amely Einstein elméleteinek magyarországi visszhangját mutatja

be az 1905 és 1945 közötti, a fizika recepciója szempontjából bizony kellőképpen még fel nem tárt időszakban.

Az *Einstein és a magyarok* hétszáz oldalnyi szövege hatalmas variációs lehetőség, amely gondosan csoportosítva tárul elénk. Tíz fejezetén először sorban érdemes végigmenni, hogy barátkozzunk az „étlappal”.

A speciális relativitáselmélet visszhangja azonnal jelentkezett az újra legfogékonyabb két elméleti fizikus, az akkor csaknem hatvanéves *Farkas Gyula*, és a nála 32 évvel fiatalabb *Zemplén Győző* írásaiban. Nagyjából 1920-ig a relativitáselmélet szakmai ügy is maradt. Talán Einstein nagyközönség számára írt könyve, talán az időközben elkészült általános relativitáselmélet kozmológiai mondanivalója keltette fel a példátlanul széles körű érdeklődést, de az is lehet, hogy az embereket egyszerűen csak lekötötte a világháború, hogy háborúban nemcsak a műzsák hallgatnak, de csökken a műzsák utáni érdeklődés is. A háború befejezésével igény keletkezett a radikálisan új dolgokra, és a fizika avantgárd tudósaként Einsteinnek kultusza támadt.

A mű és alkotója iránt ébredt, sok szempontú érdeklődés sokakat ösztönzött írásra, és utólag sem könnyű rendet teremteni a színvonal és megközelítés szerint is heterogén közegben. Az mindenképpen jó, hogy vannak a fejezetekbe rendezésnek szempontjai, hiszen a többszörös átfedés ellenére azért, ami az általános relativitáselméleti írások közé került, abban feltétlenül találunk utalást az általános relativitáselméletre. Ugyanakkor nem szabad elfelejteni, hogy az általános relativitáselméletről legjobb esetben a népszerűsítő–magyarázó szinten eshet szó, hiszen ebben a diszciplínában a fizikusok többsége is csak másodkézből rendelkezik ismeretekkel. Ebben a fejezetbe tartoznak a napfogyatkozásra vonatkozó megfigyelések is. Az Einsteinnek ítélt Nobel-díjra vonatkozó megjegyzések – köztük *Lenard* tiltakozásai – bizony egyfajta szegénye e kornak.

Maga a népszerűsítő irodalom néhány valóban magyarító írás és egy sereg kritika ezekhez. Az idő múlásának progresszív szerepét példázzák azok az értetlenkedő újságírók, akik harsányan nevetik ki az einsteini elmélet képtelen következményeit, értetlenségük felvezetésül szolgál a kritikusok számára, akik így lendületesebben tudják kifejezni az einsteini mondanivalót. Ez a másodlagos, kontra típusú érvelés pedagógiaiag meghökkentően hatásos.

A bölcséleti írások zöme akkor is a relativitáselmélet mellett áll ki, ha a szerzők kevés figyelmet fordítottak az elmélet megértésére. Több korabeli írás tanúsítja, hogy a relativitáselmélet kategorikus elutasítása bölcséleti alapon alig igényli annak ismeretét.

Pihentető szakasz az ötödik, ahol irodalmárok véleményét olvashatjuk. Az itt szereplő szerzők legalább tudnak valami azonnal ellenőrizhetőt: tudnak írni. *Karinthy Frigyes*, akinek vonzódása a természettudományhoz közismert, nemcsak az einsteini érvelés stílusparódiáját írta meg, hanem a félig értett elméletek egykedvű keveréséből adódó jólértesültség komikumát, ami szívós továbbélése miatt ijesztő. Hogy *Márainak* és *Németh Lászlónak* volt véleménye az einsteini világmépről, az természetes; de annak kell tekintenünk *Jubász Gyula* vagy *Babits Mihály* kiállítását a tér és idő újszerű szemlélete mellett, valamint azt az elszántságot, ahogy a 21 éves *József Attila* a világot jobban érteni akarók mohóságával dolgozta fel a modern fizika eredményeit.

A könyv első fele az elméletéről, a második Einsteinről szól, amennyiben ezek egyáltalán szétválaszthatók. A mind kevésbé szemérmes antiszemitizmus korszakában kezdettől szempont volt Einstein zsidósága, akit egyébként épp az antiszemitizmus ébresztett zsidósága tudatá-

ra, majd öntudatára, és lett aktív cionista. Ennek megfelelően ebbe a fejezetbe volt honnan válogatni.

Hogyan látom a világot? címen jelent meg 1935-ben az egy évvel korábbi francia cikkgyűjtemény magyar fordítása. A vallási, filozófiai, tudományos, napi politikai kérdésekről szóló hosszabb-rövidebb tanulmányokat érdeklődéssel és általában elismeréssel fogadta a magyar kritika. Zömmel ezek az ismertetések teszik ki a hetedik részt. És van itt még négy tanulmány a humanista tudós portréjával 1920 és 1945 között.

A következő rész magyar szerzők Einstein relativitáselméleten kívüli fizikai munkáiról szóló beszámolóival kezdődik, majd a külföldön élő magyar tudósok és Einstein kapcsolatáról szóló tanulmányokkal folytatódik. Ez utóbbiakból tudható meg a legtöbb Einsteinről, hiszen akik beszámolnak személyes élményeikről, maguk is a legkiválóbb tudósok közé tartoznak. Itt ismerhető meg az atombomba-kutatások megkezdéséért nagyrészt felelős levél keletkezésének hiteles története, pontosabban megbecsülhető az elérhető hitelesség mértéke. És önmagában élmény *Lánczos Kornél*, *Kármán Tódor* vagy *Wigner Jenő* visszaemlékezéseit olvasni – különleges élmény, ha ezek épp Einsteinről szólnak.

Az élmény kivételességét nehéz felejtetni az utolsó két rész írásainak olvasása közben. Magyarok Einsteinrel, illetve családtagjaival készített riportjairól van szó, illetve az 1921 és 1938 között a magyar sajtóban megjelent, Einsteinrel foglalkozó cikkekről. A bulvársajtó szokásos kíváncsisága és jólértesültsége könnyed átmenet a kiadós ebéd és a délutáni alvás között.

Ha végigfutottunk a tíz részbe rendezett hétszáz oldalra, már olyan kérdéseket is megválaszolhatunk, hogy miért támadnak napjainkig tucatjával a relativitáselmélet megreformálói, akik mellesleg a teljes fizikát is új alapra helyezik; hogy mennyire kell óvatosnak lennünk, ha egy nagy formátumú tudósról hiteles képet akarunk kapni, elutasítva a nyelvöltögetésében is Mikiegér-szerű sablont. Sokat megtudunk a húszas-harmincas évek Magyarországnak természettudományos kultúrájáról, kultúrpolitikájáról, zurnalisztikájáról. Különösen akkor, ha elolvassuk a lábjegyzeteket és szerkesztői megjegyzéseket, amelyek bizonyítják, hogy nem csupán a szövegek megkeresése, hanem azok feldolgozása és feltárása is megtörtént.

A kötet terjedelme érthetővé teszi, hogy miért zárul le 1945-ben a gyűjtés. A fordulat éve után amúgy sem lett volna ugyanaz a jelentése a kötet címének, talán *Einstein és a Läger (Béketábor) lakói* címen lehetne folytatni. Ez is ígér érdekességeket minden sivársága ellenére, de erre itt nem kerülhetett sor.

A munka a Magyar Tudománytörténeti Intézet *Magyar Tudománytörténeti Szemle Könyvtára* könyvsorozatában, *Gazda István* összeállításában jelent meg, az Akadémiai Kiadóval közös kiadásban. Műfaja szerint segédkönyv a felsőoktatási intézmények számára. Emellett azonban egyetemi sikerkönyvnek is ígérkezik ez a szép kiállítású, gondosan szerkesztett és tördelt, sok magyarító jegyzettel, precíz névmutatóval és bibliográfiával ellátott vaskos kötet, amelynek egy CD-ROM változata segíthetné a hatalmas anyagban való keresést és a folyamatos bővítést.

Füstöss László

A 2005. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJAK

Az interneten futótűz gyorsaságával terjedt el a hír, hogy a 2005-ös fizikai Nobel-díjat a Svéd Királyi Tudományos Akadémia a fény természetének kutatásában elért alapvető eredményekért ítélte oda.

Mióta ember él a Földön, a legtöbb ismeretet a fény közvetíti számára. A fény elektromágneses sugárzás, amelynek segítségével nem csupán közvetlen környezetünk tárgyai között tájékozódhatunk, hanem vizsgálatával Világegyetemünk legtávolabbi galaxisainak tulajdonságairól is ismereteket szerezhethünk.

De mi is a fény? Miben különbözik a gyertya fénye a CD-lejátszóban lévő lézerek által keltett fénysugaraktól? *Einstein* szerint a vákuumban a fény terjedési sebessége állandó. Lehetséges-e a fényen alapuló, új optikai órákat készíteni, lehet-e a mai atomóráknál jóval pontosabban mérni az időt?

A fény tulajdonságait a fizikán belül az optika tudománya kutatja, és ennek a területnek három tudósa nyerte el a 2005-ös fizikai Nobel-díjat, a fenti alapvető kérdésekre adott válaszaikért: *Roy Glauber* professzor nyerte el a díj egyik felét a fényrészecskék kvantumoptikai tulajdonságainak elméleti értelmezéséért. A díj másik felét *John Hall* és *Theodor Hänsch* professzorok kapták. Ők rendkívül pontos, új módszereket fejlesztettek ki az atomok és molekulák színének, fényének meghatározásához.

A rádióhullámokhoz hasonlóan a fény is az elektromágneses sugárzás egyik formája. Ennek klasszikus, hullámképen alapuló elméletét a skót fizikus, *James C. Maxwell* dolgozta ki az 1850-es években. A Maxwell-egyenletek alapján működnek a mai telekommunikáció adó-vevő berendezései, a mobiltelefonok, a televízió és a rádió. Ha egy vevőeszköz vagy mérőberendezés fényjelet észlel, akkor elnyeli a sugárzás energiáját, és az így keletkezett jelet továbbítja. A fényjel energiája azonban nem nyelhető el teljesen kicsiny mennyiségekben, hanem csupán bizonyos adagokban, vagy csomagokban, melyeket kvantumoknak nevezünk. 100 évvel ezelőtt Albert Einstein megmutatta, hogy a fény egy adagjának, kvantumának az elnyelődése egy fotoelektron keletkezésével jár együtt. Ez a fényelektromos hatás, melynek felfedezése hozzájárult Einstein 1921-ben elnyert fizikai Nobel-díjához. A fényelektromos hatás lényege, hogy a fény által hordozott energiaadag teljes egészében egyetlen elektronnak adódik át, és az ilyen módon keletkezett fotoelektronok számának, azaz a keltett fotoáramnak a vizsgálatával megszámlálhatjuk a sugárzás részecskéit, azaz a fény kvantumait, a fotonokat.

Ily módon a fény kettős természetű: bizonyos körülmények között hullámként, más körülmények között pedig részecskéként viselkedik. A kvantumoptika tárgya ennek a kettős természetnek a vizsgálata. E terület elméleti alapjait Roy Glauber rakta le. Elmélete segítségével

meg tudta magyarázni, mi a különbség a forró, termikus forrásból származó, különböző hullámhosszú és fázisú fénycsomagok keverékéből összetevődő fénysugarak (például a gyertya vagy a csillagfény) és a lézerek koherens, rendezett fénye között. Ilyen módon pontos értelmezést tudott adni arra a *Robert Hanbury Brown* és *Richard Q. Twiss* által megfigyelt jelenségre, hogy a távoli csillagokból két különböző optikai teleszkópban detektált fényrészecskék, fotonpárok miért érkeznek a véletlentől nagyobb valószínűséggel egyszerre a mérőberendezésbe. Elmélete segítségével rámutatott arra is, hogy hasonló korrelált fotonpárok a lézerek fényében nincsenek jelen, és éppen az ilyen korrelációk hiánya segítségével pontos kvantumoptikai értelmezést tudott adni az optikai koherencia fogalmára.

John Hall és Theodor Hänsch fontos fejlesztéseket, precíziós mérési eljárásokat dolgoztak ki, melyek lehetővé tették a fénysugárzás rezgésszámának, frekvenciájának meghatározását 15 számjegyes pontossággal. Ily módon lehetővé vált a rendkívül pontosan egyszínű lézerek készítése, és a frekvenciafésű-technika segítségével mérhető meg a tetszőleges színű fény frekvenciája. Ennek a módszernek a segítségével az atomóráknál is pontosabb optikai időmérő eszközök készíthetők. A megnövelt pontosság segítségével pedig lehetővé válik majd a földrajzi helymeghatározás, a GPS-technológia továbbfejlesztése, a gravitációs hullámok detektálása és az általános relativitáselméletet ellenőrző további precíziós kísérletek elvégzése. A telekommunikációs fejlesztések új korszaka nyílhat meg, lehetővé téve a hosszú űrutazások alatti pontosabb navigációt. Az új, optikai standard óra segítséget fog majd nyújtani az új teleszkóprendszerek koordinálásában, az antianyag, az antihidrogén tulajdonságainak, színképének a vizsgálatában, és lehetővé teszi az alapvető természeti állandók időbeli változatlanóságának kísérleti vizsgálatát.

A díjazottak életrajzi adatai és honlapjai

Roy J. Glauber: 1925-ben született az Amerikai Egyesült Államokban, New York állam New York városában, amerikai állampolgár. PhD-fokozatát 1949-ben a Harvard Egyetemen (Cambridge, MA, USA) nyerte el. Jelenleg a Harvardon a fizika Mallinckrodt-professzora.

<http://www.physics.harvard.edu/people/facpages/glauber.html>

John L. Hall: 1934-ben született az Amerikai Egyesült Államokban, Colorado állam Denver városában, amerikai állampolgár. PhD-fokozatát a pittsburghi Carnegie Institute of Technology (Carnegie Műszaki Intézetben) nyerte el 1961-ben. A Nemzeti Szabványügyi és Technológiai Hivatal

(National Institute of Standards and Technology) tudományos főmunkatársa és a Colorado Egyetem JILA Laboratóriumának munkatársa, Boulderben, Colorado államban.

<http://jilawww.colorado.edu/www/faculty/#hall>

Theodor W. Hänsch: 1941-ben született a németországi Heidelbergben, német állampolgár. PhD-fokozatát a Heidelbergi Egyetemen szerezte 1969-ben. A garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézet igazgatója, és a müncheni Ludwig Maximilians Egyetem fizikaprofesszora.

<http://www.mgq.mpg.de/~haensch/hm/haensch.htm>
Csőrgő Tamás

PÁLYÁZATOK

FELHÍVÁS JAVASLATTÉTELRE

A korábbi évekhez hasonlóan az idén is ki szándékozzuk osztani a Társulat érmeit és díjait. Ezúton is kérem a Társulat szakcsoportjait, a területi szervezeteket és a társulat valamennyi tagját, hogy a Társulat díjainak odaítélésére vonatkozó javaslataikat (pályázatokat) 2006. március 31-ig szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1027 Budapest, Fő utca 68., postacím: 1371 Budapest, Pf. 433).

A díjak odaítélésével kapcsolatban az Alapszabály vonatkozó rendelkezései az irányadóak, a díjak kiosztására az előreláthatóan 2006. május 27-én megrendezendő különdíjkiadvány keretében kerül sor.

A Társulat által adományozható kitüntetések és díjak

Társulati díjak

- *Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem* a Társulat azon tagjának, aki a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységével, valamint a társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez.
- A Társulat *Prometheusz éremmel* – „A fizikai gondolkodás terjesztéséért” – tüntetheti ki azt, aki a fizikai műveltség fokozásához országos hatással hozzájárult.
- A Társulat *Eötvös Plakett* emléktárgy annak a tagnak/személynek, aki rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához, neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

Tudományos díjak

A Társulat az alábbi tudományos díjakat adományozhatja:

- *Bródy Imre-díjat* annak a személynek, aki a fizika alkalmazásának területén,
- *Budó Ágoston-díjat* annak a személynek, aki az optika, molekulafizika vagy a kísérleti fizika területén,

FELHÍVÁS

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat különdíjat ajánl fel azoknak a fizika szakos kollégáknak, akik a 49. Országos Középiskolai Fizikatanári Anket és Eszközkiállításon a modern fizika témakörében – az iskolákban átlá-

Irodalom

A Nobel-díj hivatalos, angol nyelvű honlapja:

http://www.kva.se/KVA_Root/swe/_news/detail.asp?NewsId=693&br=ns&ver=6up

A Nobel-díjról szóló részletesebb angol nyelvű tájékoztató:

<http://www.nobelprize.org/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf>

Érdekeségként megemlítem, hogy Glauber professzor 2005 augusztusában a budapesti Kvaranyag 2005 Világkonferencia megnyitó előadójaként vendégünk volt, Munkássága a kvantumoptika területén túl kiterjed a nagyenergiás fizikára is (Glauber–Gribov-modell), budapesti előadása az interneten megtekinthető a konferencia archívumából: <http://qm2005.kfki.hu/>. Bővebben lásd a *Fizikai Szemle* 2005/11. számának 405–406. oldalát, melyben *Lévai Péterrel* beszélgetünk a konferenciáról és Glauber előadásáról.

- *Detre László-díjat* annak a személynek, aki a csillagászatban, valamint bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén,
- *Gombás Pál-díjat* annak a személynek, aki az alkalmazott kvantumelmélet kutatása területén,
- *Gyulai Zoltán-díjat* annak a személynek, aki a szilárdtest-fizika területén,
- *Jánossy Lajos-díjat* annak a személynek, aki az elméleti és kísérleti kutatások területén,
- *Novobátzky Károly-díjat* annak a személynek, aki az elméleti fizikai kutatások területén,
- *Schmid Rezső-díjat* annak a személynek, aki az anyag szerkezetének kutatása területén,
- *Selényi Pál-díjat* annak a személynek, aki a kísérleti kutatás területén,
- *Szalay Sándor-díjat* annak a személynek, aki az atom- vagy atommag-fizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén,
- *Szígyeti György-díjat* annak a személynek, aki a lumineszcencia- és félvezető-kutatások gyakorlati alkalmazásában,
- *Bozóky László-díjat* annak a személynek, aki a sugárfizika és a környezet tudomány területén,
- *Felsőoktatási Díjat* annak a személynek, aki a felsőoktatás területén kimagasló eredmény ért el.

A Társulat díjaira az Alapszabály szerint a társulat szakcsoportjai és területi szervezetei, valamint a társulat tagjai tehetnek javaslatot, de minden társulati tag maga is pályázhat a díjakra. A díjak elnyerésének a társulati tagság nem feltétele. A javaslatokat és a pályázatokat az illetékes szakcsoportok véleményével együtt a társulat weblapjáról (www.elft.hu) letölthető, vagy a titkárságon beszerezhető űrlap felhasználásával kell a Társulat titkárságára eljuttatni.

A díjazottak személyéről a Díjbizottság javaslatára a társulat Elnöksége dönt.

Kovács Ádám
főtítkár

azok körülmények között megvalósítható – kísérleteket mutatnak be. A különdíj összeg minimum 5000 Ft, maximum 50000 Ft.

ELFT elnöksége