

fizikai szemle

2008/7-8



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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

http://www.fizikaiszemle.hu

A címlapon:

Az idén szeptemberben induló
Nagy Hadronütköztető (LHC) ATLAS
(Toroidal LHC Apparatus) detektora.
(Foto: Fons Rademakers, CERN)

A hátsó borítón:

Magyar fizikatanárok tanulmányi
kiránduláson a CERN-ben,
2008 augusztusában.

TARTALOM

<i>Hraskó Péter</i> : Valószínűség	241
<i>Horváth Dezső</i> : A részecskefizika anyagelmélete: a Standard modell	246
<i>Király Péter</i> : A kozmikus háttérsugárzás kutatásának története és kilátásai	254
<i>Martinás Katalin</i> : Az energiamegmaradás történetéhez	261
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Kopasz Katalin, Gingl Zoltán, Makra Péter, Papp Katalin</i> : A virtuális mérés technika kísérleti lehetőségei a közoktatásban	267
VÉLEMÉNYEK	
<i>Papp Zoltán</i> : Mit értsünk környezetfizikán?	271
KÖNYVESPOLC	
275	
HÍREK – ESEMÉNYEK	
276	
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok (<i>Kádár Csilla, Kenesei Péter</i>)	279
MELLÉKLET	
Az elemi részecskék és alapvető kölcsönhatások Standard modellje (<i>Horváth Dezső, Kármán Tamás, Somogyi Gábor</i>)	
<i>P. Hraskó</i> : Probability	
<i>D. Horváth</i> : The matter theory of particle physics: the Standard Model	
<i>P. Király</i> : History and outlooks of background cosmic radiation research	
<i>K. Martinás</i> : The law of energy conservation: historical remarks	
TEACHING PHYSICS	
<i>K. Kopasz, Z. Gingl, P. Makra, K. Papp</i> : Virtual measurement methods: how to use them in the experiment-aided teaching of science	
OPINIONS	
<i>Z. Papp</i> : What should be considered to be "Environment physics"?	
BOOKS, EVENTS	
SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL	
Modern materials: metal foams (<i>Cs. Kádár, P. Kenesei</i>)	
SUPPLEMENT	
Standard model of fundamental particles and interactions (<i>D. Horváth, T. Kármán, G. Somogyi</i>)	
<i>P. Hraskó</i> : Wahrscheinlichkeit	
<i>D. Horváth</i> : Die Theorie der Materie in der Physik der Elementarteilchen: das Standard-Modell	
<i>P. Király</i> : Die Erforschung des Hintergrunds der kosmischen Strahlung: Geschichte und Ausblick	
<i>K. Martinás</i> : Zur Geschichte des Gesetzes von der Erhaltung der Energie	
PHYSIKUNTERRICHT	
<i>K. Kopasz, Z. Gingl, P. Makra, K. Papp</i> : Die Anwendbarkeit virtueller Messmethoden in Experimenten des Physikunterrichts	
MEINUNGSÄUSSERUNGEN	
<i>Z. Papp</i> : Was sollte „Umweltphysik“ genannt werden?	
BÜCHER, EREIGNISSE	
WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE	
Moderne Werkstoffe: Metallschäume (<i>Cs. Kádár, P. Kenesei</i>)	
BEILAGE	
Das Standard-Modell der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen (<i>D. Horváth, T. Kármán, G. Somogyi</i>)	
<i>П. Храшко</i> : Вероятность	
<i>Д. Хорват</i> : Теория вещества в рамках физики элементарных частиц: Стандартная модель	
<i>П. Кирай</i> : История и перспективы исследований по фону космического излучения	
<i>К. Мартинас</i> : Замечания по истории закона о сохранении энергии	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>К. Копас, З. Гингль, П. Макра, К. Пеп</i> : Применение методов виртуальных измерений в экспериментах обучения наукам	
ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ	
<i>З. Пеп</i> : «Физика оружающей среды» – что это такое?	
КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ	
<i>Ч. Кадар, П. Кэнишев</i> : Современные материалы: металлические пены	
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Стандартная Модель элементарных частиц и их взаимодействий (<i>Д. Хорват, Т. Карман, Г. Шолоди</i>)	

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

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

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

Kéziratokat nem 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 egyzámlán.

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

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

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVIII. évfolyam

7–8. szám

2008. július–augusztus

VALÓSZÍNŰSÉG

Hraskó Péter
PTE Elméleti Fizika Tanszék

A valószínűség a hétköznapi életben és a tudományban egyaránt nagy szerepet játszik, azonban vitatott kérdés, hogy hol húzódik a határ a fogalom pontos tudományos értelme és laza diszkurzív használata között. A problémát egy kitalált, de azért elég realiztikus részecskefizikai példán mutatom be.

Tegyük fel, hogy egy elméleti fizikus arra a következtetésre jut, hogy a neutron tartalmaz még három eddig ismeretlen típusú kvarkot, amelynek két lehetséges változata van. A két változatot fizikusunk „fehér” és „fekete” kvarknak nevezte el, de nem tudta megmondani, hogy a három újfajta kvark között hány fehér és hány fekete van: Az elmélet mind a négy lehetőséget (0, 1, 2 vagy 3 fehér kvark) egyformán megengedte.

Sikerült azonban megmutatnia, hogy a fehér-fekete színmegoszlás kísérletileg vizsgálható. Amikor ugyanis elektronokkal bombázzuk a neutronokat, az új kvarkok egyike nagyon ritkán, véletlenszerűen, virtuális részecske formájában rövid időre kilép a neutronból, és az elektron szóródni tud rajta. A folyamatot az 1. ábra (természetesen fiktív) Feynman-gráfjai szimbolizálják. Az „elmélet” szerint a fehér és a fekete kvark különböző módon szórja az elektronokat (az egyik mondjuk „jobbra”, a másik „balra”), ezért ebből a kísérletből meg lehet tudni, hány fehér és hány fekete kvark van a neutronokban.

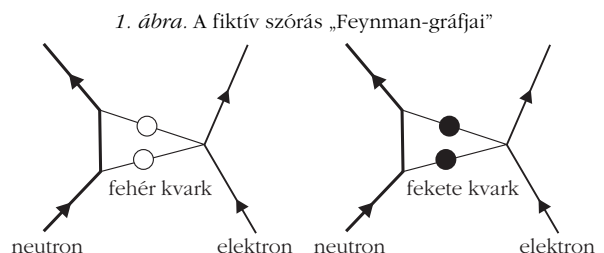
A kísérletnek ezt az aspektusát egy egyszerű urnamodellel szemlélteti. Egy urnában van három golyó, amelyek csak a színükben különböznek egymástól: lehetnek fehérek vagy feketék. Többször egymás után véletlenszerűen kiveszünk egy golyót úgy, hogy miután a golyó színét feljegyeztük, rögtön vissza is tesszük az urnába (és az urnát természetesen minden húzás előtt jól megrázzuk).

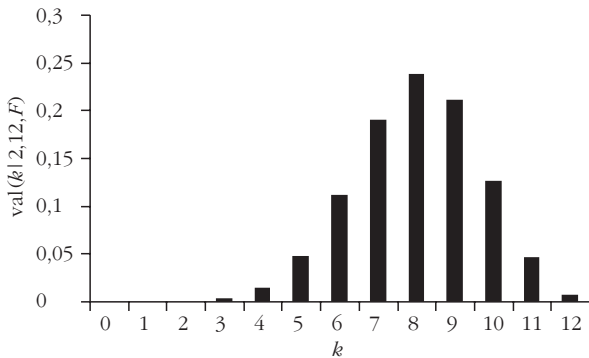
Mi a valószínűsége annak, hogy n próbálkozás során k fehér golyót húzunk? A válasz nyilván attól

függ, milyen a golyók színmegoszlása. Jelöljük a fehér golyók számát M -mel ($M = 0, 1, 2$ vagy 3). A fekete golyók száma ekkor $(3-M)$. Annak valószínűsége, hogy egy fehér golyót húzzunk ki, $M/3$ -mal, annak valószínűsége pedig, hogy feketét, $(1-M/3)$ -mal egyenlő. A kérdésünkre – milyen valószínűséggel lesz n kihúzott golyó között k fehér – a *binomiális eloszlás* adja meg a választ:

$$\text{val}(k | M, n, F) = \binom{n}{k} \left(\frac{M}{3}\right)^k \left(1 - \frac{M}{3}\right)^{n-k} \quad (1)$$

Ebben a képletben és a továbbiakban is minden valószínűséget jelentő függvényt $\text{val}(\dots)$ alakban írunk. A $\text{val}()$ függvény argumentumát a $|$ jel két részre osztja. A vonaltól balra találjuk azt a változót, amelynek a valószínűségéről szó van. A függőleges vonaltól jobbra található szimbólumok azokra a *feltételekre* utalnak, amelyek mellett a valószínűségi eloszlás érvényes. Az (1) képlet például akkor igaz, amikor az urnában M fehér golyó van és összesen n -szer húzunk. A biztonság kedvéért szerepel még egy F jel is, amely figyelmeztet rá, hogy mindig vannak specializálatlan feltételek, amelyek közül később egyet vagy többet esetleg expliciten is meg kell majd adnunk. Mivel *minden* valószínűsége egyöntetűen a $\text{val}()$ jelet használjuk, az argumentumból kell kiderülnie, minek a valószínűségéről van szó.





2. ábra. Binomiális eloszlás

Az (1) mindhárom tényezőjének világos matematikai jelentése van. Az $(M/3)^k$ annak következménye, hogy – feltételezésünk szerint – k -szor húzunk fehér golyót, az $(1-M/3)^{n-k}$ -ra pedig azért van szükség, mert a maradék $(n-k)$ alkalommal fekete golyót húzunk ki. Az

$$\binom{n}{k}$$

binomiális együttható veszi figyelembe, hány különböző sorrendben következhetnek egymás után a fehér és a fekete golyók. Ez az eloszlás helyesen van normálva, mert a binomiális tétel alapján

$$\sum_{k=0}^n \text{val}(k|M, n, F) = \left[\frac{M}{3} + \left(1 - \frac{M}{3}\right) \right]^n = 1.$$

A 2. ábrán példaként a $\text{val}(k|2,12,F)$ eloszlást ábrázoltuk.

Az (1) arra jó, hogy ha M -et ismerjük, kiszámíthatjuk, milyen valószínűséggel húzunk n próbálkozásból k -szor fehéret. Azonban nem ez az a valószínűség, amelyre szükségünk van. Az M -et szeretnénk meg tudni, azt, hogy hány fehér kvark van a neutronban (hány fehér golyót tartalmaz az urna). Már említettük, hogy az 1. ábrán felrajzolt folyamatok, amelyek erről informálnak, nagyon ritkák, ezért a kísérlet nagyon drága (a szükséges gyorsító-idő hosszú). Ezt figyelembe véve a költségvetésünket – elég rugalmasan – úgy állapították meg, hogy a kísérletet addig folytathatjuk, ameddig – mondjuk – 5 bennünket érdeklő folyamatot nem találunk, ami az urnamodellben $n = 5$ húzásnak felel meg.

Tegyük fel, hogy a kísérlet megtörtént és az 5 folyamatból 2 tartozott fehér, 3 pedig fekete kvarkhoz. Az urnamodell nyelvén ebben a helyzetben a következő kérdésre kell választ találnunk: Ha $n = 5$ húzásból $k = 2$ fehéret kaptunk, akkor hány fehér golyó van az urnában (mekkora az M)?

Biztosat nyilván nem mondhatunk, de esetleg kaphatunk M -re egy valószínűségi eloszlást, $\text{val}(M|k, n, F)$ -t, amely $\text{val}(k|M, n, F)$ -től csak abban különbözik, hogy a k és az M helyet cserélt egymással. Ez azonban egyáltalán nem lényegtelen különbség, mert a két jel a függőleges választóvonal különböző oldalán áll. A különbség illusztrálására forduljunk a kockadobáshoz. Annak $\text{val}(6|ps)$ valószínűsége, hogy 6-ost dobjunk fel-

téve, hogy a dobásunk páros, $1/3$ -dal egyenlő, mert a kockán 3 páros érték található, és ezek egyenlően valószínűk. A $\text{val}(ps|6)$ valószínűség viszont nyilván 1, hiszen ha 6-ost dobunk, azzal automatikusan a dobásunk páros is.

A valószínűségszámítás ismer egy képletet, a *Bayes-formulát*, amely kapcsolatot teremt a $\text{val}(X|Y, F)$ és a $\text{val}(Y|X, F)$ valószínűségek között. A képlet levezetéséhez azt kell felhasználnunk, hogy a $\text{val}(X|Y, F)$ feltételes valószínűséget a

$$\text{val}(X|Y, F) = \frac{\text{val}(X \text{ és } Y|F)}{\text{val}(Y|F)}, \quad (2)$$

ahol $\text{val}(Y|F) \neq 0$

képlet segítségével számíthatjuk ki, amelyben $\text{val}(X \text{ és } Y|F)$ az X és az Y együttes bekövetkezésének valószínűsége.

A (2) igaz marad, ha az X -et és az Y -t felcseréljük egymással:

$$\text{val}(Y|X, F) = \frac{\text{val}(Y \text{ és } X|F)}{\text{val}(X|F)},$$

ahol $\text{val}(X|F) \neq 0$.

Az (X és Y) kijelentés (vagy esemény) természetesen azonos az (Y és X) kijelentéssel (eseménnyel). A két képletből ennek a kijelentésnek a valószínűségét kiszűbölve jutunk el a

$$\text{val}(Y|X, F) = \frac{\text{val}(X|Y, F) \text{val}(Y|F)}{\text{val}(X|F)}, \quad (3)$$

ahol $\text{val}(X|F) \neq 0$

Bayes-formulához (*Bayes-tételhez*).

Mint látjuk, ez a képlet valóban kapcsolatot létesít a $\text{val}(Y|X, F)$ és a $\text{val}(X|Y, F)$ valószínűség között. A kockadobásos feladatban például $Y \rightarrow 6$ és $X \rightarrow ps$ azonosítással ez a reláció természetesen teljesül, mert – mint láttuk – $\text{val}(6|ps, F) = 1/3$, $\text{val}(ps|6, F) = 1$, és $\text{val}(6|F) = 1/6$, $\text{val}(ps|F) = 1/2$.

Térjünk most vissza a részecskefizikai példához (és a neki megfelelő urnamodellhez), és a Bayes-tétel segítségével fejezzük ki $\text{val}(M|k, n, F)$ -t az (1) binomiális eloszláson keresztül:

$$\text{val}(M|k, n, F) = \frac{\text{val}(k|M, n, F) \text{val}(M|n, F)}{\text{val}(k|n, F)}. \quad (4)$$

Foglalkozunk a jobb oldalon szereplő valószínűségekkel. A nevezőbeli valószínűség nem tartalmaz M -et, ezért a

$$\sum_{M=0}^3 \text{val}(M|k, n, F) = 1 \quad (5)$$

normálási feltétel segítségével kifejezhető a számlálóban álló valószínűségeken keresztül:

$$\text{val}(k|n, F) = \sum_{M=0}^3 \text{val}(k|M, n, F) \text{val}(M|n, F). \quad (6)$$

A számláló első tényezője formailag azonos az (1) függvénnyel, de – az (1)-től eltérően – itt nem k függvényeként kell érteni (fix M mellett), hanem M függvényeként rögzített k -nál. A két függvény tehát ugyanabban az értelemben különbözik egymástól, mint az x^n , amikor a független változó x (hatványfüggvény), és amikor a független változó n (exponenciális függvény). A $\text{val}(k | M, n, F)$ -nek is célszerű a két esetben különböző elnevezést adni. A (4)-ben, amikor a független változó M (rögzített k mellett), *likelihood-függvény* a neve (magyarul is!), míg az (1)-ben a k valószínűségi eloszlásának hívjuk.

A (4) számlálójának első tényezője tehát a likelihood-függvény, amit ismerünk. A második tényező mibenlétét kell még tisztáznunk. Ez a tényező – a bal oldalhoz hasonlóan – valószínűségi eloszlás M -ben, ezért eleget kell tennie a

$$\sum_{M=0}^3 \text{val}(M | n, F) = 1 \quad (7)$$

normálási feltételnek. A (4)-ben a bal oldali és a számlálóbeli M -eloszlás között az a különbség, hogy az előbbiben már figyelembe vettük a megfigyelés (szóráskísérlet, urnakísérlet) eredményét (*posterior valószínűség*), míg az utóbbi csak azokat az ismereteket tartalmazza, amelyekkel a kísérlet elvégzése előtt is rendelkezünk (*prior valószínűség*). A Bayes-formula tehát a kísérletezés lényegét fejezi ki tömör matematikai formában: *egy kísérlet értelme ugyanis az, hogy a meglévő ismereteinket korrigálja.*

Mint már mondtuk, az elképzelt kísérletünkben 5 próbálkozásból 2 golyó bizonyult fehérnek. A likelihood-függvényünk ekkor

$$\text{val}(2 | M, 5, F) = \frac{1}{3^5} \binom{5}{2} M^2 (3 - M)^3.$$

Mi lesz a prior? A kísérlet előtt fogalmunk sincs róla, milyen a színeloszlás. Ezt a teljes tudatlanságot valószínűleg akkor fejezzük ki megfelelő módon, ha kezdetben mind a négy lehetséges M -et egyenlően valószínűnek tekintjük:

$$\text{val}(M | n, F) = \frac{1}{4}$$

(ez a valószínűség semmiképpen sem függhet attól, hogy a később elvégzendő kísérletben mekkora lesz az n).

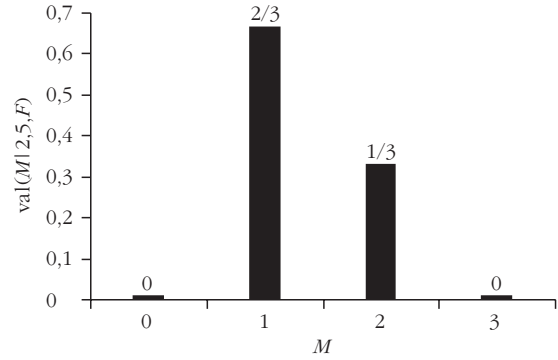
Mindezeket (4)-be helyettesítve a keresett valószínűsége a

$$\text{val}(M | 2, 5, F) = K \cdot M^2 (3 - M)^3 \quad (8)$$

képletet kapjuk. A K -ra az (5) normálási feltételből a

$$K = \frac{1}{1^2 \cdot 2^3 + 2^2 \cdot 1^3} = \frac{1}{12}$$

érték adódik. Így végül



3. ábra. Az M „tapasztalati” valószínűségi eloszlása

$$\text{val}(M | 2, 5, F) = \frac{1}{12} M^2 (3 - M)^3. \quad (9)$$

Ezt a valószínűségi eloszlást a 3. ábrán láthatjuk. Mivel fehér golyót is, feketét is húztunk, ezért bizonyos, hogy M nem lehet egyenlő se nullával, se hárommal, és a kísérlet szerint az urna kétszer olyan valószínűséggel tartalmaz egy fehér golyót, mint kettőt. Ez ugyan távol van a bizonyosságtól, de részecskefizikusunk számára értékes információt jelenthet.

◇

Ez az a pont, ahol visszatérhetünk a legelső bekezdésben felvetett problémához. A helyzet ugyanis az, hogy a valószínűségszámítás művelőinek óriási többsége szerint a (9) képlet *tökéletesen értelmetlen*, mert annak, hogy a neutronban hány fehér kvark van, *nincs valószínűsége*, hiszen ez a szám nem a véletlenül múlik, hanem határozottan nulla, vagy egy, vagy kettő, vagy három. Ugyanez a helyzet természetesen az urnával is. Bizonytalanságról és valószínűségről itt csak a színeloszlásra vonatkozó *tudásunk* kapcsán lehet szó, ami azonban esetleges, szubjektív dolog (*szubjektív valószínűség*). Az effajta szubjektív elvárást szigorúan véve nem is lenne jogos valószínűségnek hívni, mert egyáltalán nem lehetünk biztosak benne, hogy alkalmazhatók rá a valószínűségszámítás tételei, konkrétan például a Bayes-formula.

A (9)-cel ellentétben – folytatódik az érvelés – az (1) binomiális eloszlás a véletlenen múló objektív valószínűséget fejez ki, hiszen ugyanazt a kísérletet sokszor megismételve ellenőrizhető a helyessége. A legegyszerűbb esetben például, amikor csak egyszer próbálkozunk ($n = 1$), a képlet szerint $\text{val}(1 | M, 1, F) = M/3$ valószínűséggel húzunk fehér golyót. Az M itt természetesen tökéletesen határozott szám, ha az urnában mondjuk csak 1 fehér golyó van, akkor $1/3$. A kísérletet akár hányszor megismételhetjük és empirikusan meghatározhatjuk a fehér golyók előfordulásának *relatív gyakoriságát*. Azt fogjuk találni, hogy a húzások számának a növelésekor a relatív gyakoriság $1/3$ -hoz tart, ahogy ezt a valószínűség intuitív jelentése alapján várjuk is, és ez teljesen független attól, mit tudunk vagy gondolunk a színmegoszlásról az urnában.

A relatív gyakoriságként értelmezett valószínűségekről (*objektív valószínűség*) nagyon könnyű belátni, hogy eleget tesznek a valószínűségszámítás axiómáinak, és ennek következtében természetesen a

Bayes-formulának is. Annak val($ps | F$) valószínűsége például, hogy egy kockával párost dobunk, vagy az a val($6 | F$), hogy 6-ost dobunk vele, nyilvánvalóan objektív valószínűségek. Ezért nem meglepő, hogy a Bayes-formula érvényes rájuk. A val($k | M, n, F$)-fel és a val($M | k, n, F$)-fel azonban nem ez a helyzet, mert közülük csak az első objektív.

Lehet-e bármit is felhozni ezzel az objektív („frekvencista”) nézőponttal szemben a szubjektív („bayesi”) felfogás védelmében? Meg lehet például jegyezni, hogy a relatív frekvenciát csak végtelen hosszú kísérletsorozatban lehet pontosan azonosítani a valószínűséggel. Ilyen sorozatok azonban csak a képzeletünkben léteznek, ezért a frekvencista felfogás is tartalmaz szubjektív elemet. Elképzelhető azonban ennél konstruktívabb ellenvetés is: az, ha sikerülne megmutatni, hogy *a szubjektív valószínűség is rendelkezik azokkal a tulajdonságokkal, amelyek elégségesek a Bayes-tétel igazolásához.*

Több olyan gondolatmenet is ismeretes, amelyek elég meggyőzően demonstrálják, hogy valóban ez a helyzet. Az alábbiakban – befejezésül – röviden kitérek az egyikre (azért csak röviden és vázlatosan, mert a gondolatmenet nehéz, és részletes ismertetése messze meghaladná ennek az írásnak a kereteit). Előbb azonban tisztázni szeretnék egy lehetséges félreértést. Az, hogy valami igazi valószínűség-e vagy csupán „amorf elvárás”, nem azon múlik, hogy érvényes-e vagy sem. Ha például egy kockáról feltételezem, hogy egyenlő valószínűséggel esik mind a hat oldalára, utóbb pedig kiderül, hogy ez nem igaz, mert a kocka cinkelt, az eredeti hibás várakozásom ettől még valószínűségi természetű marad. Csak az érvényessége az, ami elvész. Ugyanígy, a val($M | n, F$) = 1/4 szubjektív prior az urnapéldában biztosan nem érvényes (nem igaz), de nem ezen múlik, hogy tekinthető-e igazi valószínűségnek, vagy sem.

1946-ban *Richard Cox* igényes bizonyítást adott arra, hogy a Bayes-tétel a szubjektív valószínűségekre is alkalmazható.¹ A bizonyítás a következő három feltevésen alapul:

1) A szubjektív elvárások² a mértékük szerint sorba rendezhetők: Ha X teljesülésére inkább számítunk, mint Y -éra, Y teljesülésében pedig jobban bízunk, mint Z megvalósulásában, akkor X teljesülésére inkább számítunk, mint Z -ére. Ezt a feltevést matematikusabb formában is megfogalmazhatjuk, ha az X , az Y , a Z stb. kijelentésekhez úgy rendelünk (egyébként önkényesen) $\text{elv}(X | F)$, $\text{elv}(Y | F)$, $\text{elv}(Z | F)$ valós számokat, hogy teljesüljenek az

$$\text{elv}(X | F) > \text{elv}(Y | F) > \text{elv}(Z | F)$$

egyenlőtlenségek. Az $\text{elv}(\cdot | F)$ függvény természetesen az elvárás mértékére utal az F nem specifikált feltételek

teljesülése mellett. Az F -re való utalás biztosítja, hogy a jelentős mértékben eltérő kontextushoz tartozó elvárásoknak ne kelljen egymással összehasonlíthatóknak lenniük. Nehéz elképzelni olyan körülményeket, amelyek között össze kellene hasonlítanunk mondjuk annak az elvárását, hogy holnap földrengés lesz Lisszabonban azzal, hogy a Voyager-2 űrszonda rádióadója holnap végleg felmondja a szolgálatot.

2) Ha X bekövetkeztére van elvárásunk, akkor X elmaradására is automatikusan rendelkezünk elvárással.

3) Ha van elvárásunk Y teljesüléséről, valamint arról, hogy X teljesül feltéve, hogy Y teljesül, akkor arról is van elvárásunk, hogy X és Y együttesen teljesül.

A gondolatmenetében Cox még azt is megkövetelte, hogy ha egy adott információt több különböző módon tudunk felhasználni, mindig ugyanazokhoz a következtetésekhez jussunk el, akármelyik lehetséges eljárást válasszuk is az analízishez. Azt bizonyította be, hogy ha a három feltétel teljesül, akkor az $\text{elv}(X | F)$ elvárások eleget tesznek a valószínűségszámítás axiómáinak, speciálisan az

$$\text{elv}(X | F) + \text{elv}(\bar{X} | F) = 1, \quad (\bar{X} \text{ a „nem } X” \text{ jele),}$$

$$\text{elv}(X \text{ és } Y | F) = \text{elv}(X | Y, F) \cdot \text{elv}(Y | F)$$

összefüggéseknek, és ha I bizonyosan igaz, H pedig bizonyosan hamis, akkor

$$\text{elv}(I | F) = 1,$$

$$\text{elv}(H | F) = 0.$$

Ezek az összefüggések a *valószínűségek* legalapvetőbb tulajdonságait fejezik ki, közöttük azt is, amelyik a Bayes-tétel igazolásához szükséges, ezért az $\text{elv}()$ függvényeket helyettesíthetjük bennük $\text{val}()$ függvényekkel. Cox bizonyítása alapján ezért konzisztens elvárásainkat valóban tekinthetjük valószínűségeknak.

◇

A „bayesi módszerrel” egyre gyakrabban lehet találkozni az olyan publikációkban, amelyek mérések tervezésével és az eredmények kiértékelésével foglalkoznak. Ez a módszer ugyanis jelentős mértékben kitágítja az analízis lehetőségeit, mert a problémák sokkal szélesebb körében teszi lehetővé a valószínűségszámítás részletesen kidolgozott, hatékony fogalmi és matematikai apparátusának alkalmazását. Ez az ismertetés azért született meg, mert *szubjektíven* nagyon *valószínűnek* tartom, hogy a szubjektív valószínűségek Bayes-tételen alapuló bevezetését egyre szélesebb körben fogják megengedett eljárásnak tekinteni és alkalmazni.

Függelék

A val($M | k, n, F$) poszterior valószínűség – mint láttuk – szubjektív, de matematikailag teljesen határozott kifejezés, amelynek a tulajdonságait meg lehet vizsgálni. A függelékben két olyan fontos matematikai tulajdonságára mutatok rá, amelyek megerősítenek abban, hogy nincs okunk idegenkedni a szubjektív valószínűségtől.

¹ *Am. J. Phys.* 14 (1946) 1–13.

² Az angol *belief* szó pontosabban fejezi ki, hogy mire kell gondolni. A *belief* magyar jelentései azonban (hit, meggyőződés, bizalom) olyan érzelmi töltettel rendelkeznek, amelyek alkalmatlaná teszik őket egy tisztán valószínűségszámítási fogalom megnevezésére. Ezért választottam – jobb híján – az *elvárás* nevet.

A $\text{val}(M|k, n, F)$ első argumentuma, az M változó, a 0, 1, 2, 3 értékeket veheti fel, és a függvény értéke általában egyik M -nél sem nulla. Ezek közül csak az egyik egyezik meg a fehér golyók valószínűségével az urnában. Jelöljük ezt a számot \mathcal{M} -mel. A $\text{val}(M|k, n, F)$ függvény első tulajdonsága, amelyet igazolni is fogunk az, hogy amikor a próbálkozások n száma egyre nagyobb és nagyobb, a $\text{val}(M|k, n, F)$ értéke $M = \mathcal{M}$ -nél 1-hez, a többi M értékénél pedig nullához tart. Tömören ezt így fejezhetjük ki:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{val}(M|k, n, F) = \begin{cases} 1, & \text{ha } M = \mathcal{M}, \\ 0, & \text{ha } M \neq \mathcal{M}. \end{cases} \quad (10)$$

Ennek a tulajdonságnak az ismeretében válaszolni tudunk a következő kérdésre: n előzetes húzás eredményének (a k -nak) az ismeretében mi a valószínűsége annak, hogy a következő, $(n+1)$ -edik, próbálkozásnál fehér golyót húzunk. A választ az

$$\sum_{M=0}^3 \frac{M}{3} \text{val}(M|k, n, F) \quad (11)$$

összeg adja meg. A fehér golyó valószínűsége ugyanis $M/3$ -mal egyenlő, ezt kell súlyozni a lehetséges M -ek valószínűségével. A (10) figyelembevételével nagy n -nél ez az összeg az $\mathcal{M}/3$ értékhez tart. Egy hosszú sorozatban tehát a fehér golyók gyakoriságára a $\text{val}(M|k, n, F)$ szubjektív poszterior valószínűség ugyanazt az objektív értéket szolgáltatja, mint a frekventista felfogás – teljesen elmosódik a különbség a két megközelítés között.³

A (11) képlet azonban tetszőleges számú próbálkozásra érvényes, sőt, ha a $\text{val}(M|k, n, F)$ -t a prior valószínűséggel helyettesítjük benne, azt a valószínűséget adja meg, amellyel a *legelső* próbálkozásnál húzunk fehér golyót. Mivel a prior valószínűségi eloszlás $1/4$ -del egyenlő, erre a valószínűsége – ahogy várható – az $1/2$ értéket kapjuk. Ha pedig az első húzás fehér golyót eredményezett, akkor – mivel ezen az egy tényen kívül semmiféle más információ sincs a golyók színeloszlásáról – a második húzásban $1/2$ -nél *nagyobb* valószínűséggel várhatjuk (szubjektív valószínűség!), hogy újra fehéret húzunk. A (11) képlet erre a megnöve-

³ Ilyen természetű problémával Laplace foglalkozott először. Azt a kérdést vizsgálta, hogy ha egy ismeretlen tulajdonságú pénzérmét n -szer feldobunk és a sorozatban k fejet találunk, akkor mi lesz a fej valószínűsége az $(n+1)$ -edik dobásban. A pénzfeldobást is az (1) binomiális eloszlás írja le, ha benne $M/3$ -at az érmét jellemző p paraméterrel helyettesítjük, amely a $(0, 1)$ intervallumban bármilyen értéket felvehet. Ha ezt a p -t ismerjük, a kérdés könnyen megválaszolható: A fej valószínűsége minden dobásban p -vel egyenlő. A p -t azonban általában nem ismerjük, erre a nagyon is valószínű esetre vonatkozott Laplace kérdése. Azt találta, hogy a keresett valószínűség $(k+1)/(n+2)$ -vel egyenlő. Ez a képlet tetszőleges n -nél ($n = 0$ -nál is) érvényes. Ebből vonható le az a következtetés, hogy az ismeretlen p egy hosszú sorozat relatív frekvenciájával egyenlő.

Laplace ismerte a Bayes-tételt és a jelentőségével is tisztában volt, de ebben a bizonyításban nem használta fel. A Bayes-tétel kihasználásával a bizonyítás nagyon leegyszerűsödik és kevesebb feltevést igényel, mint amennyire Laplace-nak szüksége volt.

kedett valószínűsége a $7/9$ értéket szolgáltatja, mert benne $\text{val}(M|1, 1, F) = M/6$ -tal egyenlő. Persze ha ismerenénk \mathcal{M} -et (a fehér kvarkok számát a neutronban), akkor mindkét valószínűség ugyanazzal az $\mathcal{M}/3$ -mal lenne egyenlő. De most még csak a kezdeti lépéseket tesszük \mathcal{M} megismerése felé: Ezért változik egyik lépésről a másikra a fehér golyó találati valószínűsége.

A (10) bizonyítására rátérve mindenekelőtt azt kell tisztázni, hogyan viselkedik k , amikor n a végtelenhez tart. Az $\mathcal{M} = 0$ esetben a k végig zérus, mert ekkor az urnában egyáltalán nincs fehér golyó. Amikor pedig $\mathcal{M} = 3$, az urna csak fehér golyót tartalmaz, ezért k folyamatosan n -nel egyenlő. A két közbülső esetben k viselkedését a Nagy Számok Törvénye határozza meg, amely szerint hosszú húzássorozatban a k/n arány ahhoz a valószínűséghez tart, amellyel egyszeri próbálkozásnál fehér golyót húzunk: $\mathcal{M} = 1$ -nél ez a valószínűség $1/3$ -dal, $\mathcal{M} = 2$ -nél $2/3$ -dal egyenlő.

A (8)-ra vezető gondolatmenet alapján a poszterior valószínűsége tetszőleges k , n párnál a

$$\text{val}(M|k, n, F) = K_{kn} M^k (3 - M)^{n-k} \quad (12)$$

képletet kapjuk, amelyben a normálási tényező

$$K_{kn} = \frac{1}{\sum_{m=0}^3 m^k (3 - m)^{n-k}} \quad (13)$$

értékkel egyenlő (a szumma alatti M -et azért változtattuk m -re, hogy nehezebb legyen összetéveszteni az M változóval).

Tárgyaljuk először a $k = 0$ esetet, amikor az n próbálkozás egyikében sem húzunk ki fehér golyót. Ha $\mathcal{M} = 0$, akkor ez biztosan így van, de $\mathcal{M} = 1$ -nél és $\mathcal{M} = 2$ -nél is előfordulhat. A Nagy Számok Törvénye alapján azonban ez utóbbi két esetben egy $k = 0$ -s sorozat valószínűsége $n \rightarrow \infty$ -nél nulla. Amikor $k = 0$, a (12)-ben $M = 0$ -nál a 0^0 kifejezés jelenik meg, amely határozatlan: $\lim_{x \rightarrow 0} x^0 = 1$, míg $\lim_{x \rightarrow 0} 0^x = 0$. A (12)-ben ezt a kifejezést 1-nek kell tekinteni, mert a

$$\text{val}(k|0, n, F) = \binom{n}{k} \cdot 0^k \cdot (1 - 0)^{n-k}$$

likelihood-függvényből származik, amely – mint a k valószínűségi eloszlása – 1-re van normálva:

$$\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} 0^k (1 - 0)^{n-k} = [0 + (1 - 0)]^n = 1.$$

Az összeg $k > 0$ tagjai azonban mind nullák, ezért a $k = 0$ -s tag az, ami 1-gyel egyenlő. Ebből látható, hogy az ebben a tagban szereplő 0^0 kifejezés 1-nek tekintendő.

Ennek ismeretében a (12)-ből nyilvánvaló, hogy

$$\text{val}(M|0, n, F) = \frac{(3 - M)^n}{1^n + 2^n + 3^n}.$$

Amikor $n \rightarrow \infty$, a nevező első két tagja elhanyagolható a 3^n mellett, ezért ebben a határesetben az $M = 0$ -hoz

tartozó valószínűség 1-hez, a többi nullához tart. A most vizsgált esetben ($\mathcal{M} = 0$) a (10) szerint valóban ennek kell történnie. Teljesen hasonlóan igazolható (10) helyessége akkor is, amikor $k = n$.

A közbelső tartományban, amikor $0 < k < n$, (12) szerint

$$\text{val}(M | k, n, F) = \begin{cases} \frac{2^{n-k}}{2^{n-k} + 2^k} & \text{ha } M = 1, \\ \frac{2^k}{2^{n-k} + 2^k} & \text{ha } M = 2, \\ 0 & \text{ha } M = 0 \text{ vagy } M = 3. \end{cases} \quad (14)$$

Most, amikor k nem egyenlő se 0-val, se n -nel, az n kihúzott golyó között fehérek és feketék is vannak, ezért \mathcal{M} nem lehet se 0, se 3. A (14) harmadik sora mutatja, hogy ebben a tekintetben összhangban vagyunk (10)-zel. Véges n -nél a (14)-beli két tört egyike se nulla, de az $n \rightarrow \infty$ határesetben, a (10)-zel ugyancsak összhangban, az első tört 1-hez, a második nullához tart, $\mathcal{M} = 2$ -nél pedig pont megfordítva. Ez annak

a következménye, hogy a Nagy Számok Törvénye szerint $\mathcal{M} = 1$ -nél k helyébe $n/3$ -t, $\mathcal{M} = 2$ -nél pedig $2n/3$ -t kell írunk. A (10) érvényességét ezzel minden lehetséges esetre igazoltuk.

A $\text{val}(M | k, n, F)$ másik kedvező matematikai tulajdonsága, amelyre a függelék elején utaltunk az, hogy a (10) képlet érvényes marad akkor is, amikor $\text{val}(M | n, F) = 1/4$ helyett másik prior valószínűséget választunk. Ez a prior lényegében tetszőleges lehet. Az egyetlen kikötés az, hogy egyik M -nél se legyen pontosan nulla. Ez a tulajdonság, amelyet numerikus szimuláció segítségével lehet demonstrálni, azért nagyon fontos, mert a szubjektív valószínűség kritikusainak gyakori érve, hogy a prior valószínűség megadásának a szükségessége elfogadhatatlan önkényességet visz bele a számításokba. Amikor azonban n elég nagy, a függés a prior valószínűségtől – mint látjuk – gyenge. Abban a nagyon gyakori esetben pedig, amikor az n értéke korlátozott, a poszterior valószínűséget *javíthatjuk* azzal, hogy a prior megválasztásánál maximálisan kihasználjuk az előzetes ismereteinket és a megalapozott elvárásainkat. Így például egy kísérlet megismétlésénél a korábbi kísérlet poszterior valószínűségét választhatjuk priornak.

A RÉSZECSEFIZIKA ANYAGELMÉLETE: A STANDARD MODELL

Horváth Dezső
MTA KFKI RMKI
és MTA ATOMKI, Debrecen

A CERN nagy hadronütköztető (LHC) gyorsítóját 2008-ban indítják, négy hatalmas észlelőrendszere közül kettőben jelentős magyar részvétellel. Az LHC egyik fő feladata a részecskefizika elméletének, a *Standard modell*nek kísérleti ellenőrzése. Mivel manapság igen sokszor emlegetjük, a szerkesztők kérésére megírtam ezt a bevezető jellegű összefoglalót a Standard modell elméleti alapjairól és legelemibb kísérleti bizonyítékairól. Ehhez persze jelentős mértékben felhasználtam korábbi hasonló cikkeimet – főként a *Természet Világa Mikrokozmosz* különszámában (szerk. Lévai Péter és Hegyi Sándor, 2000) és a *Handbook of Nuclear Chemistry* (szerk. Vértes Attila és társai, 2003) 1. kötetében megjelenteket –, úgyhogy, ha bizonyos dolgok visszacsengenek egy-egy hűséges és jó emlékező-tehetségű olvasónak, az nem a véletlen műve.

Állandó vita tárgya, hogyan írjuk a Standard modellt magyarul. Angolul *Standard Model*, magyarul szokás csupa kis betűvel írni. Szerintem ez nem egy szabványos modell, hanem Standard a neve, hasonlóan a pesti Váci utcához, szemben Vác egyik váci utcájával.

A továbbiakban tehát megpróbálom összefoglalni a részecskefizika alapismereteit. Mivel a fizika egzakt tudomány, csak szavak használata szükségszerűen zavar érzetét kelti. Ha cikkem összezavarja az olvasót, az a szerző hibája, nem a mögötte levő fizikai elméle-

té, amely pontos matematikai formalizmuson alapul és előrejelzései gyönyörűen egyeznek a kísérleti eredményekkel, amint azt a későbbiekben látni fogjuk.

Elemi (és még elemibb) részecskék

A természet megismerésének egyik iránya egyre mélyebbre hatolni az anyag szerkezetében. Ennek során, minden nagyobb lépés eredményeképpen újabb, oszthatatlannak hitt részecskék jelentek meg: *Démokritosz* 4 atomja (*a-tom* = oszthatatlan), *Dalton* és *Mengyelejev* elemeinek atomjai, *Rutherford* atommagja, majd az úgynevezett elemi részecskék, amelyek közül a legismertebb az elektron, a proton és a neutron, látható világunk fő alkatrészei. Az elektron valóban elemi, de a proton és a neutron egyáltalán nem azok, komoly belső szerkezettel rendelkeznek.

Az elemi részecskéket különféle szempontok szerint osztályozzuk. A legfontosabb a spin (saját perdület¹) szerinti osztályozás: a feles spinű ($S = 1/2; 3/2;$

¹ Egy R sugarú körpályán V sebességgel mozgó, M tömegű test perdülete MVR . A spin nem kapcsolható a részecskék forgásához, de hozzáadódik más eredetű perdületekhez, az atomokban például a pályamomentumhoz. Nagyságának természetes egysége a *reduktált Planck-állandó*, $\hbar = h/(2\pi)$.

5/2 ...) *fermionok* és az egész spinű ($S = 0; 1; 2 \dots$) *bozonok* szimmetria- és egyéb alapvető tulajdonságai erősen különböznek. A fermionok száma megmarad, amíg bozonokat *büntetlenül* kelthetünk vagy elnyelhetünk: egy lámpa akárhány látható bozont (fotont) kisugározhat és egy vevőantenna akárhányat elnyelhet, csak az energia és impulzus megmaradását kell biztosítanunk. Ugyanakkor a televízió képernyőjét felvillantó elektront, amely fermion, valahonnan oda kell vinnünk és dolga végeztével valahová el kell vezetnünk. Érdekes és a fizika szempontjából igen lényeges különbség az is, hogy adott állapotban akárhány bozon lehet egyidejűleg, de fermionból csak egy (Pauli-elv). Ennek következtében töltenek be az atomi elektronok egyre növekvő energiájú *energiabéjakat* és ez akadályozza meg azt, hogy az atomok az anyagban és a nukleonok az atommagban egymásba hatoljanak, ily módon biztosítva makroszkopikus formát tárgyainknak.

A részecskék másik osztályozási szempontja az, hogy a jelenleg ismert négy alapvető kölcsönhatás, a gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős közül melyekben vesznek részt. Valamennyi részecskére hat ugyan a gravitáció, de szerepe csak csillagászati szinten jelentős, laboratóriumi szinten elhanyagolhatjuk. Ugyancsak minden részecskére hat a gyenge és minden töltéssel vagy mágneses momentummal rendelkezőre az elektromágneses kölcsönhatás. Az erős kölcsönhatásban résztvevő részecskéket *hadronoknak*, közöttük a fermionokat *barionoknak*, a bozonokat pedig *mezonoknak* hívjuk. Az erős kölcsönhatásban részt nem vevő részecskék a *leptonok*. A nevek a kezdetben megfigyelt részecskék tömegéből erednek: a leptonok (pl. az elektron) könnyűek, a mezonok (pl. a pion, $m_\pi \sim 139 \text{ MeV}$,² az elektron tömegének, $m_e = 0,511 \text{ MeV}$, 273-szorosa) közepes tömegűek, amíg a barionok (proton, neutron) nehéz részecskék ($m_p = 938 \text{ MeV} = 1836 m_e$).

Szimmetriák

A szimmetriák a részecskefizikában még fontosabb szerepet játszanak, mint a kémiában vagy a szilárdtestfizikában. A jégben a hidrogénatomok tetraédres szimmetriával helyezkednek el az oxigénatomok körül; ettől lesz fajterfogata nagyobb a folyékony vízénél, amelyben nincs ilyen megszorítás. Az anyagok vezetési (elektromos, hő-, hang-) tulajdonságai pedig a különböző kristályrács-szimmetriákra vezethetők vissza. A részecskék belső szerkezetét, mindenfajta anyagelmélethez hasonlóan, szimmetriák írják le, a részecskefizikában viszont minden a szimmetriákból (vagy azok sérüléséből) származik: a megmaradási törvények, a kölcsönhatások, sőt a részecskék tömege is.

² Az Einstein-féle $E = mc^2$ tömegformula értelmében a részecskék tömegét energiával fejezzük ki. 1 eV az a mozgási energia, amelyet egységnyi töltésű részecske 1 V potenciálkülönbség *átszélése* során szerez; nagyobb egységei a $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ és a $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$.

Terünk alapvető szimmetriái vezetnek a megmaradási törvényeinkhez. Az energia- és lendületmegmaradás levezethető abból a kézenfekvő szimmetriából, hogy a fizikai törvények nem függhetnek attól, hol vesszük fel az időskálánk és koordinátarendszerünk kezdőpontját, a perdület megmaradása pedig a koordinátarendszerünk tetszőleges szögének következménye. Általában minden folytonos szimmetria valamilyen megmaradási törvényhez vezet, a vonatkozó megmaradási törvények pedig a kölcsönhatások fontos jellemzői, ezért is olyan fontos a szimmetriák felderítése.

A feles és egész spinű részecskék alapvetően különböző szimmetriájuk: a fermionok fizikai viselkedését leíró *hullámfüggvény* olyan felépítésű, hogy két azonos fermion felcserélésekor előjelet vált, szemben a bozonokéval, amely nem vált előjelet, és a korábban tárgyalt fermion-bozon különbség innen vezethető le: két teljesen azonos állapotban levő fermion közös állapotfüggvényének zérusnak kellene lennie. A részecskék spinje is furcsa szerzet; habár hozzáadódik a részecskék hagyományosabbnak tekinthető *pályamomentumához*, amely a különböző atomi pályákon elhelyezkedő (de nem igazán keringő) elektronoknak megfelelően kapta a nevét, csak két fizikai sajátállapota van: vagy jobbra forog (azaz a spinje felfelé mutat) vagy balra (lefelé). A háromdimenziós térben kell tehát kezelnünk egy olyan vektort, amely ugyan bármerre mutathat, de méréskor csak két állapot valamelyikében található, tehát csak két független mennyiség jellemzi. E két mennyiség hagyományosan a spin hossza és valamelyik irányra vett vetülete. Mivel a háromdimenziós térben a vektoroknak három komponensük van, a spin esetében valahogyan meg kell szabadulnunk a harmadik szabadsági foktól, és ez vezet a spin igencsak különös szimmetriatulajdonságaihoz.

Kitérő:³ Szimmetriacsoportok

A részecskék egy-egy jellegzetes szimmetriáját a *halmazelmélet* nyelvén *szimmetriacsoportok* segítségével írjuk le. A fizika igazi *nyelve* a matematika: az elmélet és spekuláció között a megfelelő matematikai formalizmus adja a különbséget, az teszi lehetővé ugyanis, hogy elméletünk alapján kísérletileg ellenőrizhető, szám-szerű eredményeket kapjunk.

Mivel a szimmetriák többnyire koordinátarendszerünk transzformációi során jelentkeznek, a matematikai apparátust is így választjuk meg. Erre kézenfekvő példa a síkbeli koordinátarendszer forgatása a középpont körül Θ szöggel. Az *1. ábrán* látható, hogy ilyenkor egy P pont régi (x, y) koordinátáiból az elforgatott rendszerben elfoglalt (x', y') újakat a következő transzformációval kapjuk meg:

$$x' = a + b = x \cos \Theta + y \sin \Theta, \quad (1)$$

$$y' = y'' - c = y \cos \Theta - x \sin \Theta. \quad (2)$$

³ Cikkem nehezebben emészthető és első olvasáskor elhagyható, de a mélyebben érdeklődő olvasókat érdekelhetők részeit *Kitérők*be helyeztem. Sajnos, a szimmetriacsoportok (remélhetőleg) közérthető magyarázata számos pótmagyarázatot igényel, ez a *Kitérők*nk tehát a többenél lényegesen hosszabb és fárasztóbb, mind az olvasónak, mind pedig a szerzőnek.

A P pont, mint kétdimenziós vektor, tehát a következő koordináta-transzformáción megy át:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Theta \cdot x + \sin\Theta \cdot y \\ -\sin\Theta \cdot x + \cos\Theta \cdot y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta \\ -\sin\Theta & \cos\Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3)$$

A fenti egyenlet a következőt mondja: az (x', y') vektort úgy kapjuk meg, hogy az (x, y) vektort megszorozzuk az előtte álló számtáblával, *mátrixszal*, mégpedig úgy, hogy az eredményvektor első eleméhez a mátrix első sorát, a másodikhoz pedig a mátrix második sorát kell a vektor megfelelő elemeivel szorozva összegeznünk.

A forgatáshoz vezető transzformációs mátrixok fontos tulajdonsága, hogy nem változtatják meg a P pont távolságát a koordináta-rendszerünk kezdőpontjától (hiszen egyik ponton sem mozdítottunk), azaz

$$x'^2 + y'^2 = (x^2 + y^2) \cdot (\cos^2\Theta + \sin^2\Theta) = x^2 + y^2. \quad (4)$$

A részecskefizika általában nem valós, hanem *komplex* mennyiségekkel dolgozik. A komplex számok általános alakja $x = a + ib$, ahol i a képzetes egység: $i^2 = -1$. A mérhető fizikai mennyiségeknek, természetesen, valósaknak kell lenniük, ezért azokban a komplex mennyiségek abszolút értékének négyzete jelenik meg, amelyet úgy kapunk, hogy az x komplex számot megszorozzuk a saját x^* *konjugáltjával*:

$$x^2 = x^* x = (a - ib) \cdot (a + ib) = a^2 + b^2. \quad (5)$$

Komplex mátrixoknál a konjugálást az elemeinek a főátlóra történő tükrözése, a mátrix *transzponálása* súlyosbítja. Az a feltétel tehát, hogy a forgatás a vektorok hosszát ne változtassa meg, a komplex elemű U forgatómátrixtól megköveteli, hogy *unitér* legyen, azaz hogy U^t transzponált-konjugáltja saját magával szorozva az *egységmátrixot* adja, amely a *fő átlójában* egyeseket, azon kívül nullákat tartalmaz:

$$\begin{aligned} U^t U &= \begin{pmatrix} U_{11}^* & U_{21}^* \\ U_{12}^* & U_{22}^* \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} U_{11}^* U_{11} + U_{21}^* U_{21} & U_{11}^* U_{12} + U_{21}^* U_{22} \\ U_{12}^* U_{11} + U_{22}^* U_{21} & U_{12}^* U_{12} + U_{22}^* U_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

A fenti típusú forgatások a következő matematikai tulajdonságokkal rendelkeznek:

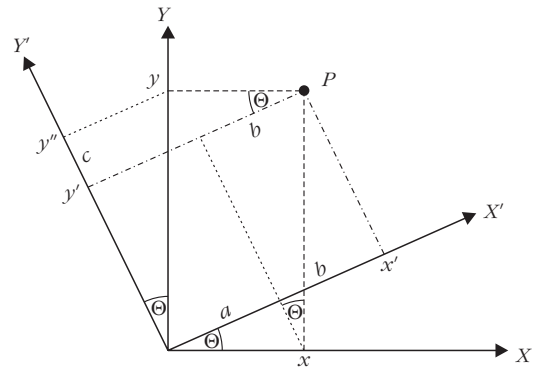
- összeadhatók: forgatás Θ_1 , majd Θ_2 szöggel egyenértékű egy $\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$ szögű forgatással;
- az összeadásuk felcserélhető: $\Theta_1 + \Theta_2 = \Theta_2 + \Theta_1$
- van egységelemük, a $\Theta = 0$ szöggel történő forgatás ugyanis semmit nem csinál.

A fenti tulajdonságokkal rendelkező matematikai objektumok *balmazát* a halmazelméletben *csoportnak* hívjuk, a háromdimenziós forgatások csoportját pedig *forgáscsoportnak*. A forgáscsoport elemeinek konkrét matematikai alakját nem írjuk fel, az túlmege cikkünk érthetőségi körén (már az eddigiek is erősen feszegetik a keretet).

Ennyi bevezetés után visszatérhetünk végre a spinre. A spin – mint már említettük – háromdimenziós mennyiség, a tulajdonságainak megfelelő szimmetriacsoport pedig a forgáscsoport. Ahhoz, hogy matematikailag kezelni tudjuk a spint, a forgáscsoportot le kell tudnunk írni, azaz egyenleteket kell tudnunk rendelni a műveleteihez: ezt *ábrázolásnak* hívjuk. A háromdimenziós forgatások csoportjának kézenfekvő ábrázolása fenti példánk alapján az $SU(2)$, a 2×2 -es speciális (egységnyi determinánsú) unitér komplex mátrixok csoportja. Egy ilyen A mátrix *determinánsa* egységnyi, ha

$$\text{Det} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = A_{11} \cdot A_{22} - A_{12} \cdot A_{21} = 1. \quad (7)$$

Az $SU(2)$ természetesen nemcsak a spinre alkalmazható, hanem bármilyen, a spinhez hasonló szimmetriájú fizikai mennyiség leírására. Az alapvető fermionok osztályozása ilyen mennyiségeken alapul, mint például a később bevezetendő *izospin*.



1. ábra. Koordináta-rendszer síkbeli forgatása: az $[X', Y']$ koordináta-rendszert az $[X, Y]$ rendszer Θ szöggel való elforgatásával kapjuk.

Ha a szabadsági fokokat növeljük, hasonló tulajdonságú, magasabb szimmetriacsoportokat kapunk. A következő fokozat, a későbbiekben ugyancsak előforduló $SU(3)$ három lehetséges *sajátállapotot* úgy kell elképzelnünk, mint egy egyenlő oldalú háromszög három sarkát, amelyek között, tehát a háromszög oldalai mentén, párosával, egy-egy $SU(2)$ szimmetria létezne.

A komplex mennyiségek miatt azonban a forgatási szabadsági fokot csökkenthetjük is, így jön létre az $U(1)$ csoport, amely az 1×1 -es unitér mátrixoké, azaz a komplex számsík egységnyi abszolút értékű számaié. Ez az elektromágneses kölcsönhatás *mértéktranszformációjának* szimmetriacsoportja. Az elektromágneses mértékszimmetria legegyszerűbb példája az, hogy az elektrosztatikus potenciál zéruspontját szabadon választhatjuk meg, az a rendszer fizikai állapotát nem befolyásolja.

Antirészecskék

A részecskéknél általában van *antirészecskéjük*, amely azonos tulajdonságú, de ellentétes töltésű, és kölcsönhatásuk *annihilációt*, sugárzásos megsemmisülést eredményez. Amikor az elektron antirészecskéje, a *pozitron* annihilál egy elektronnal, relatív spinállásuk függvényében két vagy három foton keletkezik; a proton és antiproton annihilációjakor viszont akkora energia, közel 2 GeV szabadul fel, hogy fél tucat részecske is keletkezhet.

A Világegyetem általunk belátható részében a részecske-antirészecske aszimmetria oka, azaz hogy miért nincs benne jelentős mennyiségű antianyag, a fizika antianyagból álló csillagrendszerek, azok antirészecskéket sugároznának. A galaxisok és antigalaxisok határára, ahol az egyik galaxis kibocsátotta részecskék a másik anyagával szétsugároznak, erős sugárzási zónát kellene látnunk, de a csillagászok sehol sem észlelnek ilyen jelenséget.

Kitérő: A CPT-szimmetria

Az antirészecskék érdekes tulajdonsága, hogy matematikailag úgy kezelhetők, mintha azonos tömegű, azonos nagyságú és ellentétes előjelű töltéssel rendelkező, térben és időben ellenkező irányban haladó részecskék volnának. Ez a természet fontos szimmetriája: a töltés, a tér és az idő egyidejű tükrözésétől a fizika törvényei nem változnak meg. A három tükrözési művelet angol rövidítése nyomán, *charge, parity, time* ezt *CPT-szimmetriának* hívjuk. Az elektron és pozitron annihilációját tehát úgy írhatjuk le, mintha egy elektronnal bejönne a képbe, kisugározná két vagy három foton, azután dolga végeztével, térben és időben ellenkezőleg kihátrálna; az elektromágneses áram analógiájára ezt *részecskeáramnak* nevezzük.

Egyszerű részecskeütközés esetén egy ilyen oda-vissza menő részecskeáram kölcsönhatási bozont cserél egy másik hasonló árammal. Ezt *Heisenberg határozatlansági relációja* teszi lehetővé, amely kimondja, hogy egészen rövid időtartamokra, illetve távolságokon megengedett az energia-, illetve impulzusmegmaradás sérülése: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$ és $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar/2$, ahol Δ az utána álló mennyiség (kis) változását jelöli, E, p, t, x pedig a szóbanforgó részecske energiáját, impulzusát, az eltelt időt és a megtett úthosszat. A 2π -vel osztott Planck-állandó, $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$ J/s kicsinysége biztosítja, hogy a makrovilágban a megmaradási törvények pontosan teljesülnek. A cserebozon lehet tehát *valódi* vagy *virtuális* aszerint, hogy teljesül-e rá az energia- és impulzusmegmaradás, azaz ténylegesen (kísérletileg megfigyelhetően) létrejön-e vagy sem.

A *CPT*-szimmetriát napjainkig minden kísérleti megfigyelés messzemenően alátámasztja, és szerepe annyira alapvető a térelméletben, hogy sokak szerint nem is lehet kísérletileg vizsgálni; látszólagos kis eltérések megfigyelése esetén inkább hihetünk valamelyik megmaradási törvényt sérülésében, mint a *CPT*-szimmetriáiban. Ennek ellenére komoly kísérleti erőfeszítés irányul ellenőrzésére. Legpontosabb tesztje a semleges K-mezon és antirészecskéje relatív tömegkülönbsége, amely a mérések szerint $<10^{-18}$. A CERN-ben 1999 végén megépült *Antiproton-lassító* berendezés fő célja *antihidrogén*-atomok (antiproton és pozitron kötött állapota) előállítására, hogy a hidrogénatommal összehasonlíttva a *CPT*-szimmetriát ellenőrizzék (*antianyag-fizika*).

A kvarkmodell

Az egyik legkorábbi megfigyelés, amely az elemi részecskék lehetséges belső szerkezetére mutatott, a proton és a neutron hasonlósága volt: csaknem azonos a tömegük és azonosan hat rájuk az atommagot összetartó *erős kölcsönhatás*, csak a töltésük különbözik. Bevezették tehát a *nukleon* fogalmát, amelynek két állapotát, a neutront és a protont az *izospin kvantumszám*⁴ különbözteti meg. A nukleon feles izospinje a spinjéhez hasonlóan két sajátállapottal rendelkező vektor, a felfelé mutatót rendeljük a protonhoz, a lefelé mutatót a neutronhoz.

Az izospinnek a spinhez csak annyi köze van, hogy azonos szimmetria, az *SU(2)* írja le a tulajdonságait. Az *izo* előtag magfizikai eredetű: adott protonszámú elem különböző neutronszámú *izotópjai*, illetve az adott tömegű, tehát azonos teljes nukleonszámú, de különböző protonszámú *izobár*-magállapotok az izospin segítségével azonosíthatók.

A kísérleti technika javulásával egyre több erős kölcsönhatásban résztvevő elemi részecskét, *hadront* fedeztek fel és valamennyi rendelkezett izospinnel, azaz annyi különböző töltésű, közel azonos tömegű, és egyébként igen hasonló tulajdonságokkal rendelkező részecskét lehetett megfigyelni, ahány lehetséges állapota volt az izospin harmadik komponensének (I_3). A nukleon teljes izospinje $I = 1/2$, a harmadik komponense $I_3 = \pm 1/2$ lehet a két állapotnak megfelelően. A legkönnyebb hadron, a π -mezon vagy pion teljes izospinje 1, ezért a három lehetséges sajátállapotnak ($I_3 = -1, 0$ és $+1$) megfelelően háromféle töltésű pion létezik: pozitív, semleges és negatív. Az izospin tehát az elemi részecskék osztályozásának alapvető kvantumszáma lett.

⁴ Kvantumszám: a mikrovilág olyan fizikai jellemzője, amely csak bizonyos meghatározott adagokkal *kvantumokkal* változhat; ilyen például az elektromos töltés és a peridület.

1. táblázat					
Az alapvető fermionok három családja					
	1. család	2. család	3. család	töltés	T_3
Leptonok	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	0 -1	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$
Kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$

T_3 a gyenge izospin harmadik komponense, a többi jelölést a szövegben fokozatosan ismertetjük.

Amikor azután felfedeztek egy újabb kvantumszámot, a *ritkaságot* (angolul *strangeness, furcsaság*), amely szabadon kombinálódik az izospinnel újabb és újabb hadronokban, *Gell-Mann* és *Zweig* bevezették a hadronok *kvarkmodelljét*. Három kvark feltételezésével sikerült leírni az összes addig megfigyelt részecskét. Az izospin az első két kvark kvantumszáma, és az $I_3 = \pm 1$ -sajátértéküknek megfelelően az *up* (föl) és *down* (le) nevet kapták, a harmadik pedig a *strange* (különös) nevet. Jelölésük ennek megfelelően u, d és s. A kvarkmodell szerint a kvarkok kétféleképpen kapcsolódhatnak össze: három kvark bariont (és három antikvark antibariont), illetve egy kvark és egy antikvark mezont formál. A kvarkok spinje feles (*1. táblázat*), tehát fermionok. Három kvark kötött állapota is fermion lesz tehát, a kvark+antikvark-rendszer pedig bozon. A kvarkok töltése $2/3$ és $-1/3$, így adja ki például a $p = (uud)$ állapot a proton pozitív és az $n = (udd)$ a neutron zérus töltését. Az izospin harmadik komponense tehát a részecskék töltésével van szoros összefüggésben, egységnyi növelése ugyanis azt jelenti, hogy az adott részecskében egy d-kvarkot u-kvarkra cserélünk, tehát a töltését egységgel növeljük: $+2/3 - (-1/3) = 1$.

A kvarkmodell, habár sikeresen megmagyarázta az összes megfigyelt részecske tulajdonságait, azonnal komoly ellentmondásokba keveredett. Nem volt érthető, például, miért csak a fenti két állapot jöhet létre belőlük, miért nincsenek szabad kvarkok, és hogyan lehetnek egy barionban azonos fizikai állapotú kvarkok, holott a *Pauli-elv* ezt fermionokra határozottan tiltja. A részecskefizika fejlődése során, ha valami érthetlennel találkoztunk, gyakran bevezettünk egy új kvantumszámot. Ez történt most is: mivel három lehetséges állapotot kellett leírunk, a színlátás három alapszínének analógiájára az új kvantumszámot *színek* hívjuk.

Az erős kölcsönhatás hordozója, a kvarkok három színe bevezetése az összes fenti problémát egyszeriben megoldotta: az újabb kvantumszám feloldotta a Pauli-tiltást, és annak posztulálása, hogy a természetben csak *fehér* (azaz mindhárom színt, vagy színt és antiszínt tartalmazó) részecskék létezhetnek, mert a szín-szín vonzás annál erősebb, minél inkább távolodnak egymástól a színek hordozói, megmagyarázta, miért csak a 3-kvark- és kvark+antikvark-állapotok stabilak, csakis ezek fehérek ugyanis a lehetséges

kombinációk közül. Az analógia a színlátással igen jó, hiszen az antikvark anti-színe megfelel a kiegészítő színnek. Fehérnek a három alapszín keverékét, valamint a szín + kiegészítő színt látjuk. A szín szerepe az erős kölcsönhatás töltéseként hasonló az elektromos töltéséhez az elektromágnességben, azzal a különbséggel, hogy a színek mindig vonzzák egymást, amíg az azonos töltések taszítják.

A három fermioncsalád

A kvarkmodelltől a Standard modell felé az egyik legnagyobb lépést *Glashow, Iliopoulos és Maiani* tették 1970-ben a róluk elnevezett *GIM-mechanizmus* bevezetésével. Különböző kísérleti megfigyeléseken alapuló elméleti megfontolások alapján kimondták, hogy a kvarkok párokban léteznek, a három addig ismert kvark mellett tehát léteznie kell egy negyediknek, az u kvarkhoz hasonlóan $+2/3$ töltéssel. A negyedik c (*charm*) kvarkot 1974-ben sikerült két csoportnak is kísérletileg megfigyelnie (az újonnan megfigyelt $c\bar{c}$ kötött állapotot a két csoport különbözőképpen jelölte, ezért máig J/ψ részecskének hívjuk), és ezért *Richter* és *Ting* 1976-ban megkapták a fizikai Nobel-díjat.

A párokba rendeződött kvarkok mellett ugyanannyi leptonpárnak kell lennie, különben elromlik az elmélet belső rendje; *anomáliák* lépnek fel, amikor a részecske-reakciók valószínűségét számítjuk. Az anomáliák kiküszöbölése megköveteli, hogy a leptonok és kvarkok összes töltése zérus legyen, és a kvarkok háromféle színével ez a feltétel családonként teljesül: $0-1+3(2/3-1/3) = 0$. Amikor tehát *Perl* csoportja 1975-ben felfedezte a harmadik leptont, a τ -t (Nobel-díj, 1995; ami késik, nem múlik), azonnal feltételezték újabb kvarkpár létezését. Így alakult ki az *1. táblázat* menaszériája; azóta mindkét új kvarkot megfigyelték. A fermionok helyét a párokban a nukleonok izospinjének mintájára bevezetett *gyenge izospin* (T) jelzi: a *felső* részecskékre a gyenge izospin harmadik komponense $T_3 = +1/2$, az *alsókra* $T_3 = -1/2$. A párok *gyengeizospin-dublettek*. Vegyük észre a gyenge izospin és az izospin közötti különbséget: az előbbi a gyenge kölcsönhatás kvantumszáma, amellyel valamennyi elemi fermion rendelkezik, amíg az utóbbi csak a két legkönnyebb kvarké és az erős kölcsönhatásra vonatkozik.

Ezen a ponton joggal vetődik fel a kérdés, vajon hány hasonló kvark-lepton családot rejteget még a Természet. A választ a CERN és Stanford nagyenergiájú e^-e^+ ütközőnyalábja⁵ adták meg csaknem tíz éve: semennyi, csak három család létezik. A fenti gyorsítókon előállított *Z-bozon* ugyanis valamennyi fermionpárra elbomolhat, és a Standard modell a bomlási csatornákat pontosan leírja, az egyetlen ismeretlen tényező a lepto-

nokhoz tartozó neutrínók száma; mivel a hagyományos detektorok a neutrínót nem észlelik, ezek *láthatatlan* bomlási módusok. A teljes bomlási élettartam és a látható módusok mérésével megállapították a láthatatlankét, és abból kiderült, hogy háromféle könnyű neutrínó, tehát csak a már meglévő három leptoncsalád létezik (egy esetleges nehezebb, tehát a töltött leptonokéval vagy a mezonokéval összemérhető tömegű neutrínóhoz nem okvetlenül tartozna új család).

Az *1. táblázat* tehát a Standard modell által jelenlegi tudásunk szerint megengedett összes alapvető fermiont tartalmazza. A kedves olvasót ne rémítse meg a fenti kijelentés látszólag túlzott óvatossága. A megalkotása óta eltelt három évtizedben a Standard modellt sokféle módon sikerült elméletileg kiterjeszteni, ami számos (sőt időnként rengeteg) új hipotetikus (azaz egyelőre csak a fizikusok képzeletében élő) részecske megjelenéséhez vezetett. Bár egyelőre semmiféle kísérleti bizonyítékot nem találtunk sem a Standard modell teljeskörű érvénye ellen, sem a kiterjesztések jósolta új jelenségek, illetve részecskék mellett, az utóbbiakat teljesen kizárni sem lehet.

A kölcsönhatások

Mint említettük, a gravitációról elfeledkezve, a részecskefizikában három kölcsönhatásról szoktunk beszélni, alapvető tulajdonságaikat a *2. táblázat*ban összegezzük.

A Standard modell szerint a kölcsönhatások helyi szimmetriákból erednek, forrásuk valamilyen töltés, és bozonok közvetítik őket. Ezek a bozonok nemcsak a kölcsönhatások hordozóiként, hanem szabadon is léteznek, ugyanolyan elemi részecskék tehát, mint az *1. táblázat* fermionjai, és kísérletileg is észlelhetők. Egy fermion részt vesz egy kölcsönhatásban, ha rendelkezik annak töltésével: a gyenge kölcsönhatás valamennyi fermionra hat, az elektromágneses az elektromosan töltöttekre, az erős pedig a kvarkokra.

2. táblázat					
A három alapvető kölcsönhatás					
kölcsönhatás	relatív erősség	potenciál	élettartam	közvetítő bozon	M (GeV/c ²)
erős	1	$\sim r$	10^{-23} s ($\Delta \rightarrow p\pi$)	8 gluon	0
el-mágn.	10^{-2}	$\sim \frac{1}{r}$	10^{-20} – 10^{-16} s ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)	foton	0
gyenge	10^{-7}	$\sim \frac{1}{r} e^{-r/R}$ $R \sim \frac{\hbar}{M_W c}$	$>10^{-12}$ s ($\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$)	W^\pm Z^0	80 91

A harmadik oszlopban r a távolság, R pedig a hatótávolság. A negyedik oszlopban a tipikus élettartamok alatt, zárójelben egy-egy jellegzetes reakciót is felsoroltunk. Az utolsó oszlopban a közvetítő bozon nyugalmi tömege szerepel.

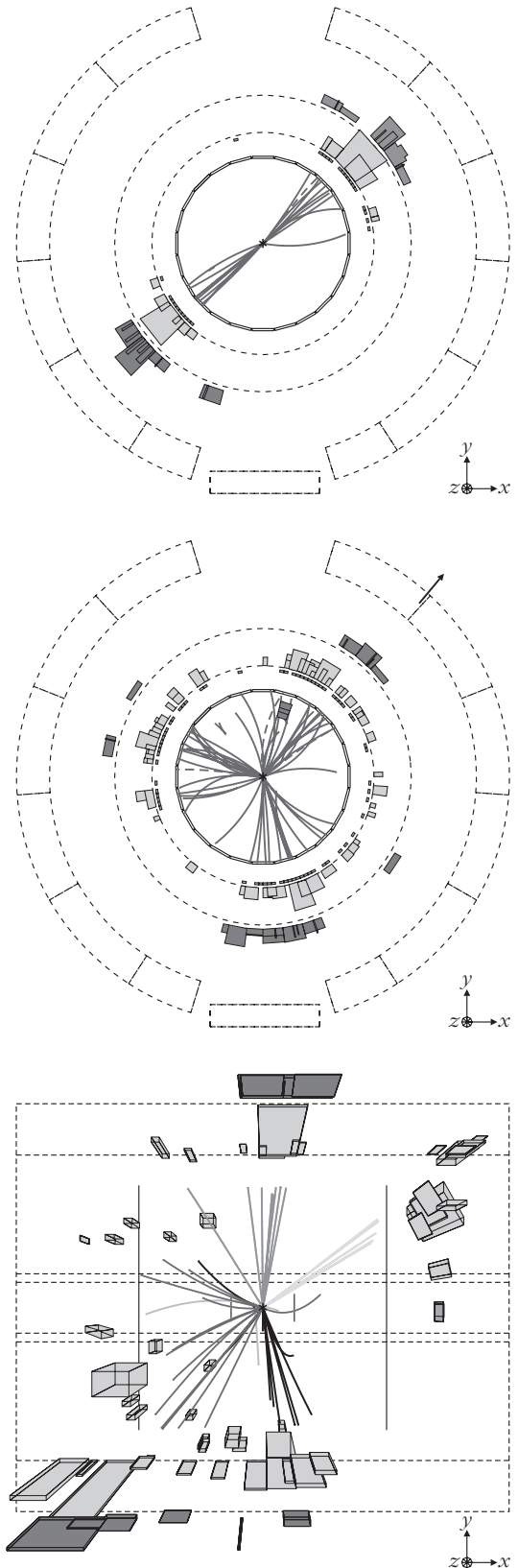
⁵ A hagyományos gyorsítók részecskenyalábjába álló céltárgyba ütközik, úgy hoz létre új részecskéket. Sokkal tisztább körülmények között, sokkal nagyobb energiákat lehet elérni, ha két részecskenyalábot gyorsítanak egymással szemben és őket egy észlelőrendszer közepén ütköztetik.

Az elektromágneses kölcsönhatás hordozója a foton (jele γ), a gyengéé a három *gyenge bozon* (W^+ , W^- és Z^0). Mivel az erős kölcsönhatás során a két kvark színt cserél, hordozójának, a *gluonnak* (*glue* angolul ragasztó) egy színt és egy *antiszínt* kell hordoznia. Ez nyolc különböző gluont jelent, mert a 3×3 lehetséges szín-antiszín kombinációból létrehozható egy olyan, a $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$, amely fehérből fehérbe vinne át, tehát nem jelentene színcserét.

Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás összehasonlítására kitűnő példa a pionbomlás. Tipikus elektromágneses folyamat a semleges pion bomlása két fotonra: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $8 \cdot 10^{-17}$ s élettartammal. A töltött pion ugyanakkor csak gyenge kölcsönhatásban tud bomlani müonra és neutrínóra, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, és az élettartama ennek megfelelően $26 \text{ ns} = 2,6 \cdot 10^{-8}$ s, nyolc nagyságrenddel nagyobb a semleges pionénál. Vegyük észre, hogy a fenti reakcióban a bozon eltűnt, de a lepton egy antilepton társaságában keletkezett: a fermionok száma megmarad, a bozonoké nem.

Az elektromágneses kölcsönhatás tulajdonságait régen ismerjük: forrása az elektromos töltés, közvetítő bozonja a foton, helyi szimmetriája, amelyből származtatható, a Maxwell-egyenletek *mértékszimetriája*.⁶ Ez a szimmetria az elektromágneses potenciál nullpontjának szabad választásával kapcsolatos: a fizikai erő potenciálkülönbség következménye; ezt a marok bizonyítja, amikor nyugodtan üldögélnek a nagyfeszültségű vezetéken. A lokális követelménye azt jelenti, hogy megköveteljük a mozgásegyenletek invarianciáját akkor is, amikor a mértéktranszformáció tartalmaz egy tetszőleges téridő-függvényt; némi matematikai manipuláció árán ez a függvény fogja szolgáltatni az elektromágneses teret. Mivel a foton tömege zérus, az elektromágneses kölcsönhatás végtelen hatótávolságú; potenciálja a töltések távolságával fordítottan arányos. A fotonokat mindennapi életünk során szemünkkel és televíziós vevőkészülékünkkel is észleljük, létezésükhöz tehát nem férhet kétség.

Az erős kölcsönhatás forrása a *színtöltés*, közvetítője a nyolc *gluon*, helyi szimmetriája pedig a három színnek megfelelően az $SU(3)$ szimmetria.⁷ A gluonok tömege is zérus, tehát az erős kölcsönhatás is végtelen hatótávolságú, potenciálja viszont közelítőleg a színes részecskék távolságával egyenesen arányos. Ez annak a következménye, hogy – a fotonnal ellentétben – a gluonok maguk is hordozzák a színt, a kölcsönhatás forrását, tehát saját magukkal is kölcsönhatnak. Ha tehát két kvarkot megpróbálunk egymástól elválasztani, a terük energiája a távolsággal nő, mert a gluonok egyre több újabb gluont és kvark-antikvark párt keltenek közöttük, a kvarkok pedig hadronokká alakulnak, amíg az összes szín el nem tűnik; ezért nem észlelünk szabad kvarkot (*kvarkbezárás*).



2. ábra. Hadronzárók (jetek) a gyenge bozonok bomlásánál keletkező kvarkokból és gluonokból, ahogyan azt a CERN Nagy elektron-pozitron ütköztetőjénél az OPAL-detektor észlelte. Felül: a Z-bozon bomlása egy b-kvarkpárra (ahogyan azt a jetek alakjaiból meghatározták), $e^-e^+ \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b} \rightarrow 2$ jet. Középen: a Z-bozon bomlása két b-kvarkra és az egyik kibocsát egy gluont, $e^-e^+ \rightarrow Z \rightarrow b\bar{b}+g \rightarrow 3$ jet. Lent: egy W^+W^- pár négy kvarkra bomlik, 4 jetet adva.

⁶ Az unitér ($U^\dagger U = 1$) 1×1 -es mátrixok (azaz az egységnyi abszolút értékű komplex számok) $U(1)$ szimmetriacsoportja.

⁷ 3×3 -as speciális (egységnyi determinánsú) unitér mátrixok szimmetriacsoportja

A kvarkokat mégis észleljük kísérletileg, nagyenergiájú részecskeütközések során keletkező, közel egy irányba kirepülő részecskenyalábok, *hadronzáporok*, *jetek* formájában. Elektron-pozitron ütközésnél, például, keletkezhetnek kvark-antikvark párok, és a megmaradási törvények miatt, tömegközépponti rendszerben, ezeknek 180° alatt kell kirepülniük. Ahogy egymástól távolodnak, az állandóan növekvő térerő addig kelt gluonokat és újabb kvark-antikvark párokat, amíg valamennyi részecske színtelen nem lesz. Nagyobb energiákon ez akkora részecskesokaságot jelent (10–20 részecskét egy jetben), amely semmilyen más fizikai folyamattal nem értelmezhető. A gluonok létezését a 3-jetes események észlelése bizonyította, ezek ugyanis csak úgy jöhetnek létre, ha egy kvark-antikvark pár egyik tagja kibocsát egy gluont, minden más folyamatot tiltanak a megmaradási törvények (2. *ábra*).

A kvarkbezárás következményeként az erős kölcsönhatás hatótávolsága gyakorlatilag igencsak véges; mintegy 1 fm azaz 10^{-15} m, az atommag méretéhez közeli. Az atommagot tehát az erős kölcsönhatásnak a nukleonokból *kilógó* része tartja össze, hasonlóan a kémiai kötéshez, amely a semleges atomokból kilógó elektromágneses potenciál következménye.

A Higgs-mechanizmus

A gyenge kölcsönhatás származtatására a gyenge izospin $SU(2)$ szimmetriája szinte tálcán kínálja magát. A dolog azonban szépséghibás: az elmélet a három közvetítő részecske, a W^+ , W^- és Z^0 *gyenge bozonok* tömegére is zérus tömeget jósol, noha a gyenge kölcsönhatás igen rövid hatótávolságából nagy tömegek következnek. A Heisenberg-féle határozatlansági reláció ugyanis, mint korábban említettük, lehetővé teszi, hogy egy M tömegű részecske $\hbar/(2Mc^2)$ ideig sértse az energiamegmaradást (itt $\hbar = h/(2\pi)$ a Planck-állandó és c a fénysebesség vákuumban); így képes a 80 GeV tömegű W^+ bozon közvetíteni a neutronbomlásnál, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, felszabaduló 1,3 MeV (csaknem 5 nagyságrenddel kevesebb!) energiát. A gyenge kölcsönhatás hatótávolsága $R = \hbar/(M_W c) \approx 2 \cdot 10^{-3}$ fm, közel 3 nagyságrenddel kisebb, mint az atommag átmérője. Ráadásul az $SU(2)$ invariancia nem viseli el a fermionok tömegét: tömegtagok jelenlétében a mozgásegyenlet invarianciája sérül. Kérdés tehát, honnan van a részecskéknek tömegük?

Ezt az ellentmondást oldotta fel a *spontán szimmetriasértés* elmélete (felfedezőjéről Higgs-mechanizmusnak hívjuk), amely a Standard modellt mai formájára hozta. A Higgs-mechanizmus feltételezi egy olyan négykomponensű függvény (komplex izospin-dublett) létezését, amely hozzáadódik a fermionokat leíró függvényhez, mintha a fermionok ebben a térben mozognának. Az egyébként tömeg nélküli fermionok a Higgs-térrel kölcsönhatásban tömeget nyernek, hasonlóan ahhoz, ahogy egy töltött részecske folyadékban sokkal nehezebben mozog, mint vákuumban,

mert az elektrosztatikus vonzás következtében magával kell hurcolnia a környezetében levő, polarizált molekulákat.

A Higgs-tér sérti az $SU(2)$ -szimmetriát, és ezzel, a szilárdtestfizika *kvázirészecskéihez* hasonlóan olyan új részecskéket hoz létre, amelyek közül három elnyeli az elmélet zérus tömegű közvetítő részecskéit, ezáltal tömeget *teremtve* nekik és létrehozva a három áhított, nehéz gyenge bozont, a negyedik komponense pedig, melléktermékként, újabb nehéz részecskét hoz létre, a *Higgs-bozont*. A Higgs-mechanizmusnak még számos jótékony hatása van, amely teljesen kezelhetővé teszi az addig ellentmondásokkal terhes modellt: lehetőséget teremt arra, hogy kiszámoljuk a folyamatok valószínűségeit; nélküle az egyenletekben végtelen tagok lépnek fel, hatására azonban kölcsönösen kiejtik egymást.

Habár rengeteg jel mutat arra, hogy a Higgs-bozonnak léteznie kell, kimutatnunk eddig még nem sikerült. A LEP-gyorsító utolsó éve erre irányult, de a négy kísérlet együttes erőfeszítése is csak azt mutatta, hogy a Higgs-bozonnak, ha létezik, 114,4 GeV/ c^2 -nél nagyobb a tömege. Nagyon reménykedünk benne, hogy az idén induló LHC kísérletei meg fogják figyelni.

A gyenge kölcsönhatás egyéb furcsaságai

Adósok vagyunk még az 1. *táblázatban* szereplő két jel, az L index és a kvarkok jele melletti aposztróf magyarázatával: mindkettő a gyenge kölcsönhatás különlegessége.

Az egyik a *paritássértés*. Ha egy karórát úgy építünk meg, hogy a tervrajzát tükörben nézzük, azaz tükrözzük, valószínűleg pontosan jár majd, legfeljebb a mutatója forog majd ellenkező irányban és a számai-betűi lesznek az általunk megszokottak tükörképei. Sokáig azt hittük, hogy a fizika valamennyi törvénye tükrörszimmetrikus, amíg *Lee* és *Yang* elméleti jóslata alapján (Nobel-díj, 1957) *Wu* asszony kísérlete meg nem mutatta, hogy mágneses térben a kobalt-atommag bomlása során a térrel ellenkező irányban bocsátja ki bomlási elektronjait.

A másik két kölcsönhatás megőrzi a rendszerek paritását, azaz *emlékszik* rá, jobbra vagy balra (azaz mozgásirányba vagy azzal ellenkezőleg) volt-e polarizálva, amíg a gyenge maximálisan sérti azt. Ez abban nyilvánul meg, hogy a gyenge kölcsönhatás során a részecskék inkább balra, amíg az antirészecskék jobbra polarizálva keletkeznek, amennyire azt a megmaradási törvények engedik: ezt jelképezi az 1. *táblázat* dublettjei melletti L (angolul *left* = bal). A neutrínó esete extrém: ha zérus a tömege, a neutrínó csak balra polarizálva, az antineutrínó pedig csak jobbra polarizálva létezhet.

A paritássértés felfedezése után sokáig azt hitték, hogy a CP -szimmetria, tehát a fizikai törvények változatlansága a töltés és paritás egyidejű tükrözésével szemben, általános érvényű; egészen 1964-ig, amikor *Cronin* és *Fitch* (Nobel-díj, 1980) felfedezték, hogy a

gyenge kölcsönhatás azt is sérti, ha nem is maximálisan, mint a paritást, csak egy íci-picit. Mint említettük, a *CPT*-szimmetriát abszolútnak tartjuk. A *CP*-sértés elvi lehetőséget nyújt arra, hogy megkülönböztessük a világot és antivilágot, és valószínűleg kapcsolatban van az anyag-antianyag aszimmetriával. Visszatérve a karóra példájára, a térbeli (P) tükrözés a jobb-bal cserét jelenti, a töltéstükrözés (C) azt, hogy az órát antianyagból csináljuk, az időtükrözés (T) pedig azt, mintha az óra mozgását rögzítő videofelvételt ellenkező irányban játszánánk le.

A gyenge kölcsönhatás a kvarkok fajtáját sem tiszteli, ellentétben a másik kettővel: az erős kölcsönhatásban keletkezett kvarkok a gyenge kölcsönhatás szempontjából a három családból vett állapotok keverékei.⁸ Praktikus szempontból elég vagy az alsó vagy a felső típusú kvarkokat keverteknek feltételeznünk; megállapodás szerint az alsókat keverjük, és erre utal az alsó kvarkok jelei feletti vessző. Ha a neutrínóknak tényleg nullától különböző a nyugalmi tömege, amire mutatnak kísérleti jelek, akkor a leptonállapotok is keveredhetnek.

Kitérő: Keveredési szögek

A részecskeállapotok keveredését *keveredési szögekkel* jellemezzük. A három alsó kvarkot egy háromdimenziós tér koordinátatengelyeinek képzelve, a rendszert három szöggel kell elforgatnunk a három tengely körül, hogy megkapjuk az összes lehetséges kvarkkeveredést. A három szögből pedig megkapjuk a (d,s,b) vektort (d',s',b')-be transzformáló *Cabibbo-Kobayashi-Maskawa*-mátrixot. A *CP*-sértés a három keveredési szög mellett negyedik paraméterként egy fázisszöget visz a CKM-mátrixba.

Másik nevezetes keveredés a gyenge és elektromágneses kölcsönhatás egyesítésekor (*Glasgow, Weinberg és Salam, Nobel-díj, 1979*) fellépő *gyenge keveredés*. A részecskefizikában, ha két állapot keveredését nem tiltja valamilyen törvény, akkor keverednek, azaz a természetben előforduló állapotok az elsődlegesek lineáris kombinációi lesznek. Ez történik a gyenge kölcsönhatás semleges árama és az ugyancsak semleges elektromágneses áram között. Az utóbbi semlegessége viccesen hangzik, hiszen az elektromos áram elektromos töltések árama, viszont mint áram semleges, mert a foton nem hordoz töltést, tehát a kölcsönhatás folyamán a rendszer töltésállapota nem változik meg. A foton és a semleges gyenge bozon keveredésekor csak egy szög lép fel, a *Weinberg-szög* (vagy *weak* = gyenge keveredési szög), amelyet így két okunk is van Θ_w -vel jelölni. A gyenge keveredés miatt lesz a gyenge bozonok tömege különböző: a Z^0 valamivel nehezebb a W^\pm -nél, mert a foton *besegít*.

Valamennyi keveredési szög szabad paraméter, tehát nem elméletileg megjósolható, hanem kísérletileg megállapítandó érték.

A Standard modell jelene és kilátásai

A Standard modell alapvető alkatrészei tehát a három fermioncsalád és a három helyi szimmetria, amelyből a három kölcsönhatás és 1+3+8 közvetítő bozonja származtatható a szimmetriasértő Higgs-tér áldásos közreműködésével, amely utóbbi melléktermékeként megjelenik a Higgs-bozon. Nem tudjuk, miért éppen az említett három szimmetria hozza létre a három kölcsönhatást, de azt igen, az elektromágneses $U(1)$ szimmetriája

az elektromos töltés skalár (azaz egykomponensű) voltával, a gyenge kölcsönhatás $SU(2)$ szimmetriája a kétkomponensű gyenge izospinével, az erős kölcsönhatás $SU(3)$ szimmetriája pedig a háromféle színével van összefüggésben.

A Standard modellnek 19 szabad paramétere van; aki ezt soknak találja, arra gondoljon, hogy elvileg az egész (mikro)világot leírja velük. Mindhárom kölcsönhatásnak van erőssége (csatolási állandója), a finomszerkezeti állandó az elektromágnesesé, a Weinberg-szög a gyengéé és ott van még az erős kölcsönhatás állandója. Szabad paraméter a 3 töltött lepton és a 6 kvark tömege (és még három a neutrínóké, ha figyelembe akarjuk venni, de azt a számításokban általában elhanyagolhatjuk), a Higgs-bozon tömege, valamint a kvarkok keveredési mátrixának 4 eleme. Az utolsó két paramétert az erős kölcsönhatás és a spon-tán szimmetriasértés elmélete adja.

A Standard modell helyességét számtalan kísérleti megfigyelés igazolja. Mindjárt születésekor számszerűen megjósolta a gyenge bozonok tömegét és más tulajdonságait, amit a kísérlet később teljes mértékben igazolt (*C. Rubbia, Nobel-díj, 1984*). A létrehozása óta eltelt csaknem 30 év alatt a kísérlet minden jóslatát teljes mértékben igazolta, semmiféle olyan megfigyelésünk nincs, amely ellentmondana neki. A Higgs-bozon kivételével valamennyi alkatrészét megfigyeltük, utoljára a t-kvarkot, és a Természet vakon engedelmeskedni látszik neki. Még az az új megfigyelés sem mond igazán ellent a Standard modellnek, hogy a neutrínóknak lehet némi (igen kicsi) tömege.

Joggal felmerül tehát a kérdés, mi szükség van még gyorsítókra, és egyáltalán részecskefizikusokra, ha egyszer ilyen, mindent helyesen leíró elmélettel rendelkezünk. A válasz a Standard modell nevében rejlik: nem teljes elmélet, csak modell, amelyről nem igazán értjük, miért működik ilyen jól. Három mértékelmélet jónéhány szabad paraméterrel ellátva összeházasítottunk; megfejtük egy *ad hoc* Higgs-mechanizmussal, mert különben nem működik; mesterségesen hozzátettük a fermionok tömegét, és annak örülünk, hogy mindezt hagyja, azaz nem vezet elméleti ellentmondásokra. Nem tudjuk, miért van éppen három fermioncsaládunk és mi a kapcsolat egy-egy család fermionjai között, azon kívül, hogy a töltésösszegük zérus. Nem tudjuk, miért nincs antianyag a látható univerzumunkban és mi alkotja a Világegyetem sötét anyagát. Nem sikerült továbbá észlelnünk a modell kulcsfiguráját, a Higgs-bozont, amelynek léte és tulajdonságai bizonyítanak a Standard modell érvényét.

Vannak jelei annak, hogy a Standard modell mögött egységes, mélyebb elmélet lehet. Erre vall az a megfigyelés, hogy a három kölcsönhatás erőssége, azaz *csatolási állandója* az energia növelésével hasonló érték felé tart, tehát mintha egy univerzális kölcsönhatásra lennének visszavezethetők. Kiküszöbölendő a fenti problémákat, az elmúlt 3 évtizedben a Standard modellnek számos kiterjesztése született, és a jövő kísérleteinek kell döntenie, melyik írja le közülük helyesen a mikrovilágot.

⁸ Precízebben fogalmazva: a kvarkok erős kölcsönhatás szerinti sajátállapotai nem egyeznek a gyenge kölcsönhatás szerintiekkel.

A kölcsönhatásokat egyesítő elméletek közül ma a *szuperszimmetria* (SUSY) a legnépszerűbb, bár igazát egyelőre semmiféle kísérleti megfigyelés nem bizonyítja. Szimmetriát feltételez a fermionok és bozonok között, tehát azt, hogy minden ismert fermionnak és bozonnak van szuperszimmetrikus partnere: a feles spinű leptonoknak és kvarkoknak zérus-spinű részecskék, a kölcsönhatásokat közvetítő, egyes spinű bozonok és a Higgs-bozon szuperpartnerei pedig feles spinű fermionok.

A Standard modell lehető legegyszerűbb szuperszimmetrikus kiterjesztése, a *Minimális Szuperszimmetrikus Standard modell* (MSSM) az elmélet csaknem valamennyi problémáját tetszetősen megoldja, de igen nagy áron: a rengeteg új részecske mellett igen sok új paraméter bevezetésével. Az utóbbi években érdekes versenyfutásnak vagyunk tanúi a kísérleti és elméleti kutatók között: a kísérletek hiába igyekeznek megfigyelni a megjósolt új szuperpartnereket, és eközben mind nagyobb részeket zárnak ki a lehetséges paraméterértékek terében; eközben az elméle-

tek, számításaik, modelljeik finomításával egyre növelik az elméleti alapon megengedett és kísérletileg még nem tanulmányozott paraméter-tartományokat.⁹ Mivel általában feltételezzük, hogy a szuperszimmetria érvénye esetén a legkönnyebb szuperpartner alkotja a sötét anyagot, valóságos áttörést hozott ezen a területen a WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) mesterséges hold vizsgálata, amely óriási területeket törölt (azaz nyilvánított valószínűtlennek) az MSSM elméletileg lehetséges paraméterteréből.

Ajánlott irodalom

- Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat, Budapest, 1986; 5.5. fejezet.
 Leon Lederman: *Az isteni a-tom, avagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem*. Typotex, Budapest, 2008 (Fordította: Vassy Zoltán).
 Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám: *Kísérleti atomfizika*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1998.
 Patkós András, Polónyi János: *Sugárzás és részecskék*. Typotex, Budapest, 2000.

⁹ Ebből a megfogalmazásból az olvasó számára nyilvánvalóvá kell válnia, hogy a szerző maga kísérleti kutató.

A KOZMIKUS HÁTTÉRSUGÁRZÁS KUTATÁSÁNAK TÖRTÉNETE ÉS KILÁTÁSAI

Király Péter
 KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztály

A feketetest-sugárzás spektruma egyszer s mindenkorra összefonódott *Max Planck* nevével. Planck 19. század végén és 20. század elején elért eredményei nemcsak a korabeli kutatás élvonalát jelentették, de nagymértékben elősegítették a kvantumfizika, sőt egész modern fizikai világpépünk kialakulását is.

Fontos azonban hangsúlyoznunk, hogy a Planck-spektrum a környezetével termodinamikai egyensúlyban lévő elektromágneses sugárzás fizikai jellemzője, és eredetileg semmilyen kapcsolatban sem állt kozmológiai kérdésekkel, vagyis Univerzumunk múltjának, térbeli kiterjedésének és szerkezetének kérdéskörével. Igaz, hogy Planck a feketetest-sugárzás tanulmányozása során már 1899-ben bevezette abszolút egységrendszerét, amely a c fénysebességen, a G gravitációs állandón, valamint (lényegében) a később h hatáskvantumnak vagy Planck-állandónak elnevezett mennyiségen alapult [1]. Planck kiemelte ennek az egységrendszernek az univerzális, Világegyetemünk bármely részén érvényes, antropomorf mértékegységektől megszabadított jellegét. Ez azonban csupán a fizikai törvények univerzalitásának feltételezését tükrözte, és nem volt közvetlen kapcsolatban a tényleges Univerzum fejlődésének és szerkezetének kérdéseivel.

Az ELFT és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya rendezésében Max Planck születésének 150. évfordulója alkalmából tartott emlékülésen elhangzott előadás szerkesztett változata.

Annak vizsgálata, hogy milyen is Világmindenségünk szerkezete, sokáig elsősorban a vallás és filozófia, majd a távcső és *Newton* törvényeinek felfedezése után egyre inkább a csillagászat és a newtoni mechanika vadászterülete volt. A 20. század első harmadában *Einstein* általános relativitáselmélete és az Univerzum tágulásának felfedezése, majd később a csillagok energiatermelésével és a kémiai elemek keletkezésével kapcsolatos számítások hozták egyre közelebb egymáshoz a modern fizikai és csillagászati gondolkodást. A legnagyobb áttörést talán az 1965-ös év hozta, amikor többé-kevésbé véletlenül kiderült, hogy a múlt mélyéből, a tér minden irányából hideg feketetest-sugárzás éri Földünket, és hogy ez a könnyű elemek keletkezéséért is felelős ősi tűzgolyó adiabatikusan lehűlt maradványa. Ettől kezdve hatalmas verseny indult e sugárzás tulajdonságainak minél jobb mérésére, valamint a mérési adatok alapján az ősi Univerzum tulajdonságainak megértésére. Ez az erőfeszítés egyre inkább összekapcsolódott az elemi részecskék fizikájának kutatásával, mivel az ősi tűzgolyó elég korai szakaszában a legnagyobb gyorsítóinkkal elértnél is nagyobb energiájú részecskék fordulhattak elő. Ez az együttműködő versengés most is folyik. A következő lépcsőfok a gyorsítók terén az LHC, a CERN nagy hadronütköztetője, a feketetest-háttérsugárzás irányeloszlásának vizsgálata terén pedig a Max Planckról elnevezett, elsősorban európai kooperációban elkészült űrszonda. Várhatóan mindkettő még 2008-ban munkába áll.



1. ábra. Edwin Hubble (1889–1953) a Mount Wilson obszervatórium 2,5 méteres teleszkópjánál 1923-ban. Ezzel a távcsővel mérte meg a galaxisok vöröseltolódását, és fedezte fel, hogy az Univerzum tágul.

Miért sötét az éjszakai égbolt – és miért még sem az?

A nappali égbolt tiszta, felhőtlen időben fényesnek látszik a napfény légköri molekulákon való szóródása miatt, bár felületi fényessége sokkal kisebb, mint a Napé. Az éjszakai égbolt viszont sötét, csak halvány csillagok pislákolnak rajta. Ez a különbség olyan ősi élménye az emberiségnek, hogy sokáig mindenki természetesen tartotta. Pedig mást várnánk, ha világunk statikus, térben és időben végtelen, a térfogategységre jutó csillagok száma pedig térben és időben állandó lenne. Könnyű belátni, hogy ekkor akármerre nézve valamilyen csillag felületére látnánk rá [2]. Tegyük fel ugyanis, hogy minden csillag felületi fényessége és mérete is Napunkéval azonos. Ekkor egy tőlünk adott távolságban, egységnyi vastagságú gömbhéjban lévő csillagok átlagos száma a távolság négyzetével, az egyes csillagokból hozzánk érkező fény viszont a távolság négyzetének reciprokéval arányos. A gömbhéjból hozzánk érkező fény mennyisége tehát független a távolságtól (ha csak a fény egy részét egy közelebbi csillag részben vagy egészen el nem takarja). A végtelen Univerzumban a távolság szerint integrálva az eltakarások nélkül végtelen fényerősséget kapnánk, azokat is figyelembe véve viszont minden látósugarunk csillagban végződné, vagyis az egész éjszakai (és nappali) égboltot is Nap-fényességűnek látnánk.

E látszólagos paradoxon többek között már *Keplert* is izgatta, nevét mégis egy 19. század eleji német orvos-csillagászról (*Heinrich Olbers*) kapta. Az sem jelentené a paradoxon feloldását, ha a nagyon távoli

csillagokat közbeeső porfelhők takarnák el, hiszen akkor e porfelhők is a csillagok hőmérsékletére melegednének.

Az Olbers-paradoxon táguló, véges élettartamú Univerzumunkban nem lép fel, így ma már jól érthető, hogy a tipikus csillagok hőmérsékletének megfelelő optikai frekvenciákon miért sötét éjszakai égboltunk [2]. Egyrészt a fénysebesség és az első csillagok keletkezése óta eltelt idő véges (ez az oka annak, hogy az éjszakai égbolt fényét adó csillagok összességükben is csak az égbolt teljes térszögének parányi részét fedik le), másrészt a nagyon távoli csillagok hozzánk érő fénye a vöröseltolódás miatt is halványabbnak látszik a látható színek tartományban.

Van-e azonban a spektrumnak olyan tartománya, amelyben mégis fényes az éjszakai égbolt? A választ a kozmikus háttérsugárzás felfedezése és későbbi részletes vizsgálata adta meg. Kiderült, hogy az ősi tűzgyőlőből származó sugárzást minden irányban (ahol azt valamilyen előtérben lévő abszorbens nem akadályozza) „láthatjuk”, és e sugárzás spektruma mintegy 2,725 K hőmérsékletű feketetest-sugárzásának felel meg. Éjszakai égboltunk tehát az ilyen hőmérsékletű sugárzásban (a néhány tized mm-től néhány dm-ig terjedő hullámhosszakon) maximális fényességgel ragyog. Spektruma pedig a maximum közelében sokkal közelebb áll a Max Planck által levezetett elméleti feketetestspektrumhoz, mint a Napé és más csillagoké, sőt annál is, mint amit laboratóriumunkban elérhetünk.

Persze a „ragyog” kifejezés talán túlzásnak tűnhet, hiszen egyrészt e sugárzás szabad szemmel nem látható, másrészt a Planck-spektrum maximumától távol lévő hullámhossztartományokban sok közelebbi lévő forrás túlragyogja azt. Nagy hullámhosszakon elsősorban a nagy energiájú elektronok Tejútrendszereink mágneses terében keltett szinkrotronsugárzása, kis hullámhosszakon a kozmikus porfelhők hőmérsékleti sugárzása a fő vetélytárs. Ezek, valamint a csillagok spektruma azonban a számunkra érdekes hullámhossztartományokban nagyon erősen eltér a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzásától, így az előtérforrások járuléka több hullámhosszon való méréssel viszonylag jól leválasztható.

Bár Tejútrendszereinknek azon vidékén, ahol Naprendszerünk van, a csillagfény energiasűrűsége valamivel felülmúlja a háttérsugárzásét, Univerzumunk egészében az elektromágneses sugárzás energiasűrűsége szempontjából a mikrohullámú háttérsugárzás dominál.

A kozmikus háttérsugárzás felfedezésének néhány előzménye

A 20. század első évtizedeiben Einstein általános relativitáselmélete és *Edwin Hubble* (1. ábra) táguló világegyeteme adta meg az első lökést a modern kozmológia kialakulásához. A görbült téridő és a benne lévő anyag kapcsolatát leíró Einstein-egyenletek, va-

lamint a távolsággal első közelítésben arányosnak talált vöröseltolódás új, már fizikailag és csillagászati-
lag is megalapozottnak tekinthető világmodellek felé
nyitottak utat.

A Világegyetem tágulásának matematikai lehetősége már korán, röviddel az általános relativitás elméletének megalkotása után felmerült. Az Einstein-egyenletekre *Willem de Sitter*, majd *Alexander Friedmann* és később *Georges Lemaître* (2. ábra) adott olyan megoldásokat, amelyek táguló univerzumnak voltak értelmezhetőek. Einstein viszont egy statikus, véges, de határtalan megoldást talált, és ezt részesítette előnyben, bár ehhez kénytelen volt bevezetni egy egyenletei esztétikai értékét némileg elrontó új paramétert, a kozmológiai állandót. Az 1920-as évek második felében Edwin Hubble a cefeida-változók vizsgálatával kimutatta, hogy Univerzumunk nem csak a Tejútrendszerből áll, hanem sok ahhoz többé-kevésbé hasonló távoli „ködöt” (galaxist) is tartalmaz. A nagy szenzációt 1929-es dolgozata jelentette, melyben a ködök látszólagos fényességét korábban, mások által mért vöröseltolódásukkal hasonlította össze. Eszerint e ködök nagyjából távolságukkal arányos vöröseltolódást mutatnak, vagyis minél messzebb vannak tőlünk, annál nagyobb sebességgel távolodnak. Ez egyébként de Sitter modellje alapján várható volt, és Hubble munkáját is ez motiválta.

Georges Lemaître belga csillagász volt az, aki a 20-as évek végén legkövetkezetesebben hangsúlyozta, hogy a tágulás tényéből egy korai, sokkal sűrűbb állapotra következtethetünk („kozmosz tojás” hipotézise a nagy űsrobbanásról vallott mai felfogás elődjének tekinthető). Lemaître és Hubble munkássága nyomán a táguló Univerzum koncepciója általánosan elfogadottá vált, sőt a 30-as évek elejétől Einstein is feladta korábbi álláspontját. Maga Lemaître viszont később, főleg *Fritz Zwicky* hatására, hajlott a „fáradt fény” hipotézis elfogadására, amely szerint a távolsággal növekvő vöröseltolódás nem Doppler-sebességgel, hanem gravitációs vagy más hatásokkal magyarázható. Később Hubble is hasonló következtetésekre jutott. A tisztánlátást az is akadályozta, hogy az akkori megfigyelések szerint a tágulás sebességét jellemző Hubble-állandó túl nagynak, az Univerzum ebből származtatott kora túl kicsinek adódott a csillagok, sőt Földünk más módszerekkel meghatározott korához képest. Ezeket az ellentmondásokat később a cefeida-változók típusainak megkülönböztetése és jobb megismerése révén sikerült kiküszöbölni.

A 30-as és 40-es években a magfizika fejlődése elérhető közelségbe hozta a csillagok energiatermelésének és az elemek keletkezésének megértését. Hamar világossá vált, hogy az energiatermelésben a fő szerepet a hidrogén héliummá alakulása játssza, a részfolyamatok és a többi elem kialakulásának megértéséhez azonban számos magfizikai adat hiányzott. *Hans Bethe* és *Fred Hoyle* neve említhető talán elsőként a csillagok belsejében végbemenő magfizikai folyamatok leírásánál, de *George Gamow* eredményei is fontos szerepet játszottak. Sokáig úgy látszott, hogy a

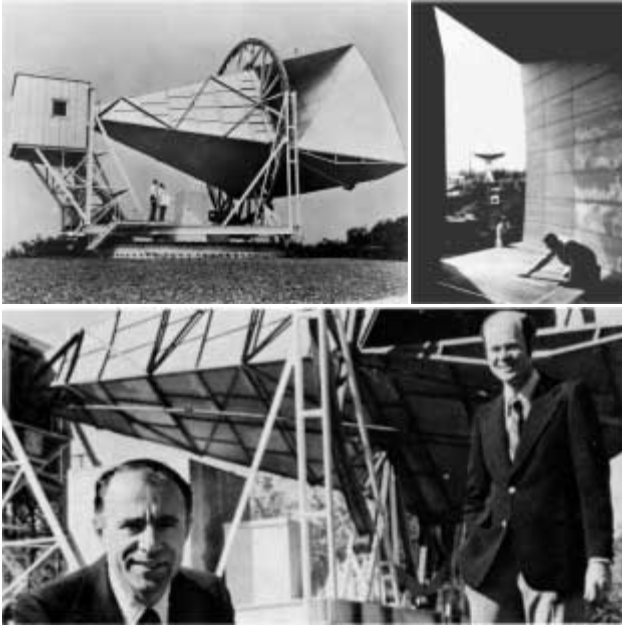


2. ábra. Willem de Sitter (1872–1934), Alexander Friedmann (1888–1925) és Georges Lemaître (1894–1966) a táguló univerzum hipotézis úttörői.

héliumnál nehezebb elemeket az 5 és 8 tömegszámú stabil izotópok hiánya miatt nem lehet a csillagok belsejében szintetizálni, és e nehézségen csak az 50-es években sikerült túllépni.

A rendkívül invenciózus, de gyakran kissé felületes Gamow látott hozzá, hogy az elemek csillagok előtti, forró és táguló Univerzumban való keletkezésének lehetőségeit doktoranduszával kidolgoztassa. Bár 1948-ban a kémiai elemek eredetéről *Ralph Alpher*rel közösen írt dolgozata [3], amelynek szerzői közé Gamow tréfából Bethe nevét is bevette ($\alpha\beta\gamma$ -elmélet), ezer sebből vérzett, az ősi nukleosintézis fő folyamatát lényegében jól írta le. Feltételezve, hogy kezdetben csak neutronok álltak rendelkezésre, a bomló és a bomlástermékekbe befogódó neutronok megfelelő kezdeti hőmérséklet és sűrűség esetén a folyamat végén a tapasztalathoz közeli hélium/hidrogén arányra vezettek. Az egész folyamat a neutron bomlásidejével összehasonlítható időtartam, vagyis percek alatt kellett hogy végbemenjen, ami nagy szenzációt keltett (Alpher védésén mintegy 300 érdeklődő vett részt, az újságok pedig szalagcímekben hozták a híreket). Kritikusai hamar rámutattak arra, hogy a javasolt folyamat nehéz elemek előállítására nem alkalmas, emellett közvetlen megfigyelésekkel bizonyították, hogy a csillagokban viszont létrejönnek nehéz elemek (ha az nem is volt világos, hogyan).

Gamowék más fiatal munkatársakkal közös munkában finomították a számításokat, és elég pontos becsléseket kaptak arra, hogy a folyamat a táguló Univerzum milyen hőmérséklete és sűrűsége mellett mehet végbe. A csillagok belsejéhez képest entrópiában sokkal gazdagabb, nukleononként mintegy 10^9 fotont tartalmazó környezetre van szükség, amelyben a fotongáz energiasűrűsége sok nagyságrenddel felülmúlja a nukleonkomponensét. Az e folyamatokat biztosító ősi tűzgolyó létéből következett, hogy az Univerzum tágulása során a fotonokkal szoros kapcsolatban lévő plazma előbb-utóbb különválik semleges gázra és szabad fotonokra, majd a fotongáz további adiabatikus lehűlés után minden irányban terjedő háttérsugárzást alkot. Az ősi tűzgolyó paraméterei alapján körülbelül 5–10 K hőmérsékletű mai háttérsugárzásra számítottak, bár ezeket a számokat többször is módosították, és dolgozataikban sem e sugárzás spektrumát, sem megfigyelésének lehetőségeit nem tárgyalták. Későbbi visszaemlékezésekből kiderült,



3. ábra. Felül balra: a Bell-laboratórium kürtőszerű rádióantennája Holmdale-ben (New Jersey), ezzel fedezte fel Arno Penzias (alul balra) és Robert Wilson (alul jobbra) a maradványsugárzást. Jobbra fent: a Nobel-díjhoz vezető út antennatisztítást is tartalmaz.

hogy Alpher próbált tapogatózni rádiócsillagász ismerőseinél, hogy kimutatható lenne-e esetleg ilyen sugárzás, de a technika akkori állása mellett erre nem látszott lehetőség. A spektrum vizsgálata pláne irreálisnak tűnhetett, így azzal nem is foglalkoztak. Pedig a Planck-spektrum fontos tulajdonsága, hogy adiabatikus tágulás után is feketetestjellegű marad, csak hőmérséklete csökken a lineáris tágulással fordított arányban.

Az 50-es években ez a Fred Hoyle által gúnyosan *Nagy Bummnak* (Big Bang) nevezett elmélet nem vált népszerűvé az elméleti csillagászok körében. Hoyle és munkatársai egyrészt részletesen kidolgozták az elemek csillagok belsejében végbemenő nukleoszintézisének elméletét, másrészt kozmológiai szempontból a „folytonos teremtés” hipotézisét támogatták, amely szerint a lokális feltételek időben lényegében állandóak. Érdekes viszont, hogy 1964-ben éppen Fred Hoyle mutatott rá arra, hogy ha az összes megfigyelhető hélium csillagokban jött volna létre, akkor a megfigyeltnél mintegy 10-szer több csillagfényt kellene látnunk. E problémát a csillag-előtti nukleoszintézis és az azt követő adiabatikus lehűlés (vagy vöröseltolódás) kényelmesen elkerüli.

Aki keres – és aki talál

A 60-as évek első felében a részecskefizika és az űrkutatás látványos eredményei miatt megnőtt az érdeklődés a kozmikus fizika alapkérdései és a kozmológia iránt. Princetonban *Robert Dicke* és csoportja minden korábbinál pontosabb *Eötvös*-kísérlettel igazolta a gravitáció ekvivalencia-elvének érvényességét. Dicke javaslatára ezután hozzákezdtek a táguló Univerzum-

ból esetleg visszamaradt sugárzás elméleti vizsgálatához (*Peebles*) és egy ezzel kapcsolatos megfigyelés előkészítéséhez (*Wilkinson* és mások). A Szovjetunióban *Zeldovics* és *Doroskevics* vizsgálta az ősrobbanás maradványainak kimutathatóságát, de a rádiócsillagász-zsargon egyes kifejezéseit félreértve azt hitték, hogy az amerikai kutatók korábbi megfigyelései már kizárták a várt hőmérsékletű háttérsugárzást. *Steven Weinberg* eredetileg 1977-ben írt, magyarul is megjelent könyvében [4] részletesen tárgyalja annak okait, hogy 1965 előtt miért nem keresték nagyobb erőbedobással a forró Univerzum mai maradványait.

A rádiócsillagászat az 50-es években nagy technikai fejlődésen ment át, és a műholdas megfigyelések is hozzájárultak új antennák és detektálási módszerek kifejlesztéséhez. Az Egyesült Államokban a Bell Laboratóriumok egy korábban műholdas mérésekre használt igen érzékeny, kiterjedt források abszolút intenzitásának mérésére is alkalmas, kürtőszerű rádióantennája (3. ábra) a 60-as évek elején feleslegessé vált. Két fiatal kutató, *Arno Penzias* és *Robert Wilson* kapott lehetőséget arra, hogy ennek az új típusú antennának a rádiócsillagászatban való felhasználhatóságát megvizsgálják, majd tudományos méréseket is végezzenek vele. A kalibrációs mérések után korábbi doktori témáik, a galaktikus elektronok szinkrotronsugárzása és a semleges hidrogén 21 cm-es rádiósugárzása pontosabb vizsgálatát tervezték. Előmérésként egy olyan hullámhosszon (7,35 cm) kezdtek méréseket, ahol a korábbi, nagyobb hullámhosszú mérések és a várható hullámhosszfüggés alapján Tejútrendszerünk fősíkjától távol már igen kis intenzitású szinkrotronsugárzás volt várható. Azt akarták ellenőrizni, hogy a különböző irányokban mért rádió zaj valóban jól leírható-e a talaj, a légkör, valamint a műszer egyes komponensei járulékaiknak összegeként. 1964-ben végzett méréseik azt mutatták, hogy a különböző járulékok levonása után is marad egy 3–4 K hőmérsékletű feketetest járulékaának megfelelő maradék. Először gyanakodtak a kürtő-antennájukba beköltözött galambok által termelt „fehér dielektrikumra”, de ennek eltávolítása, sőt a galambcsalád elköltöztetése sem segített. Volt bennük elég türelem és következetesség, hogy a közel izotróp háttér minden általuk lehetségesnek tartott okát kiküszöböljék.

1965-ben véletlenül, egy közös ismerős révén tudták meg, hogy a közeli Princetonban *Robert Dicke* és csoportja pont ilyesfajta háttérsugárzást keres. Bár a számukra ismeretlen elmélet hipotetikus következményeiben nem nagyon bíztak, a két csoport megegyezett abban, hogy az elméleti várakozásokat és a mérési eredményeket két egymás utáni cikkben közölik. Ezután hamar kiderült, hogy a két gyanútlan, de lelkiismeretes kutató eredménye forradalmasította a kozmológiát, és a 20. század egyik legnagyobb felfedezésének bizonyult. A fizikai Nobel-díjat 1978-ban kapták meg. Bár kevéssel utánuk az elméleti értelmezést megadó *Dicke*-csoport kutatói is megfigyelték a háttérsugárzást, nekik már sokkal kevesebb elismerés jutott.

A felfedezés közvetlen következményei

A maradványsugárzás felfedezését követően nagy verseny indult mind tulajdonságainak pontosabb mérésére, mind a korai Univerzum elméleti leírására és mai következményeinek feltárására. A felfedezés fő üzenete az volt, hogy az Univerzum tágulását és forró eredetét komolyan kell venni, és nem csak kozmológiai, de részecskefizikai következményeit is vizsgálni kell. Hiszen az ősi nukleoszintézis előtti időben sokkal nagyobb energiájú részecskék is léteztek, mint amiket ma gyorsítóinkban elő tudunk állítani, és az elektromágneses háttérsugárzás ezeknek az ősi kölcsönhatásoknak valószínűleg nem egyedüli maradványa. Így a forró Univerzum természetes következménye, hogy neutrínó-háttérsugárzás is létezik, és ennek jelenlegi hőmérséklete, sűrűsége jól kiszámítható. De létezik-e gravitációs háttérsugárzás? Termodinamikai egyensúlyban volt-e valaha a gravitációs sugárzás az anyag többi formáival? És az ősi kölcsönhatásokban létrejöttek-e olyan, esetleg nagy tömegű részecskék, amelyek ma minimális kölcsönhatásban állnak világgunk látható anyagával?

Ahogy Földünk történetét is nagyrészt kővületek alapján ismerjük meg, régi Univerzumunk „kővületeit”, fosszilis maradványait is érdemes keresni. Az eddig talált legfontosabb ilyen kővület a kozmikus háttérsugárzás mellett Univerzumunk mai anyagi összetétele és hierarchikus szerkezete.

Röviddel a háttérsugárzás felfedezése után *Andrej Szabarov* hívta fel a figyelmet arra, hogy milyen feltételek mellett alakulhatott ki az ősi Univerzumban a közönséges anyag parányi túlsúlya az antianyaghoz képest, ami később, a nukleonok és antinukleonok nagy annihilációja után gyakorlatilag antianyag nélküli Univerzumhoz vezetett. *Joseph Silk* hangsúlyozta először a háttérsugárzás kis anizotrópiáinak fontosságát, amelyek feltételezése szerint mai galaxishalmazaink és szuperhalmazaink kialakulásának csíráit alkották. Ismét intenzív vizsgálat tárgyává vált az úgy-

4. ábra. A Pierre Auger detektorrendszer (Argentína) 1600 Cserenkov-detektorából egy az előtérben, háttul az első fluoreszcens detektor épülete Los Leones mellett.



nevezett „sötét anyag”, amelynek gravitációs hatását Fritz Zwicky már a 30-as években kimutatta (a sötét anyagról és kozmológiai vonatkozásairól *Fényes Tibor* a *Fizikai Szemle* 2008. márciusi számában írt összefoglaló elemzést [5]). A háttérsugárzás tulajdonságai- ból derült ki később, hogy a sötét anyag nem állhat barionokból (protonokból és neutronokból), mert akkor az ősi nukleoszintézis során nem a megfigyelt mennyiségű deutérium jött volna létre. A mikrohullámú háttérsugárzás hatásainak elemzésekor fontos következtetésre jutott *Greisen*, *Zacepin* és *Kuzmin* a legnagyobb energiájú kozmikus sugárzás spektrumával kapcsolatban is (GZK-hatás). Megmutatták, hogy mintegy $5 \cdot 10^{19}$ eV felett a spektrum elég éles csökkenést kell, hogy mutasson, mivel ilyen energiájú protonok a mikrohullámú háttérsugárzás fotonjaival ütközve már pionokat keltenek, ami jelentős energiavesztéssel jár. Az idén elkészülő, *Pierre Auger*-ról elnevezett 3000 km² kiterjedésű detektorrendszer (4. ábra) eddigi adatai szerint ez a gyors csökkenés valóban megfigyelhető.¹

Az elméleti spekulációk mellett további, pontosabb mérések is elkezdődtek. Fontos kérdés volt, hogy a háttérsugárzás színképeloszlása valóban Planck-spektrumnak felel-e meg. Dicke csoportja kisebb hullámhosszon, 3,2 cm-en mért, és 2,5 és 3,5 K közötti hőmérsékletet talált.

A hosszabb hullámhosszakon végzett mérések is 3 K körüli hőmérsékletet mutattak. Léggömbök és rakéták segítségével is végeztek méréseket. Kiderült, hogy egy 1941-es, csillagközi gázfelhők abszorpciós vonalaira vonatkozó mérés szerint 2,6 mm-en is hasonló a hőmérséklet. Bár a közvetlen méréseket a Planck-görbe maximuma környékén légkörünk akadályozta, 1972-re általánossá vált a meggyőződés, hogy a spektrum nagyjából megfelel a feketetest-sugárzásnak (persze volt egy pár eltérő eredményt adó mérés is). A hetvenes évek közepére az is nyilvánvalóvá vált, hogy a spektrum és az esetleges anizotrópia pontosabb vizsgálatához légkörünkön kívüli, mesterséges holdon végzett mérésekre van szükség.

A precíziós kozmológia kezdetei: a COBE-időszak

A kozmikus háttérsugárzás tulajdonságait vizsgáló első műholdra (COBE, COsmic Background Explorer) 1974-ben már született javaslat, de felbocsátására csak 1989-ben került sor. A lassan forgó szonda a Nap–Föld-tengelyre nagyjából merőleges síkban, a Földtől 900 km

¹ Noha nehéz elhinni, az argentin pampákon körülbelül 1400 méter magasságban valóban 3000 négyzetkilométeren (Nógrád megyénél nagyobb területen) helyezkednek el a mintegy 12 négyzetméteres vízzel töltött Cserenkov-detektorok. A detektorok háromszöges elrendezésben, szomszédjuktól 1,5 km-es távolságban vannak. Mivel ilyen nagy energiákon (a GZK-levágás fölött) egy-egy részecske a földfelszínen több km-es sugarú részecskezéport kelt, ilyen nagy távolságok esetén is jó néhány detektor ad jelet, s ezek megbízhatóan jellemzik az eredeti részecske érkezési irányát és energiáját.

távolságban keringett. Fő feladata a spektrum és az anizotrópia pontos vizsgálata volt, de fontos szerep jutott egy olyan műszernek is, amely elsősorban az előtérforrások (csillagok, gázfelhők, por, elektronok fékezési és szinkrotronsugárzása) járulékait vizsgálta.

Egyik leglátványosabb eredményt a távoli infravörös abszolút spektrofotométer (FIRAS, Far Infrared Absolute Spectrophotometer) műszer érte el. Kimutatta, hogy a háttérsugárzás hőmérséklete 0,001 K pontossággal 2,725 K, még a Planck-görbe maximumánál rövidebb hullámhosszakon is. A feketetestspektrumon olyan pontosan ültek a mérési pontok, hogy az általában egyszeres szórást jelölő függőleges vonalkákat legalább 50-szeresre kellett növelni, hogy az elméleti vonalból „kilógjanak”. Ilyen pontos Planck-görbét a laboratóriumban sem tudunk rekonstruálni.

A másik fontos kozmológiai műszer, a differenciális mikrohullámú radiométer (DMR), az abszolút hőmérséklet helyett a különböző irányokból jövő sugárzás parányi eltéréseit mérte. A mikrohullámú technikában alapvető fontosságú Dicke-kapcsoló segítségével a műszer másodpercenként több ezerszer hasonlított össze a különböző irányokból érkező intenzitást. Ezzel egyrészt mérte a fluktuációk átlagos négyzetes eltérését és részben kiküszöbölte az elektronikus eredetű zajokat is, másrészt a szonda forgása és keringése során feltérképezte az égbolt hőmérsékleti különbségeit. A kapott relatív eltérések mindössze százazrednyi nagyságrendűnek adódtak, természetesen a csillagászati előtérforrások hatásának elég sok számolást igénylő levonása után. Mivel a műszer irányfelbontása elég gyenge (7° körüli), a hőmérsékleti térkép finomszerkezetére nem lehetett következtetni. Az izotrópiától való eltérés kimutatása és az ősi Univerzum hőmérsékleti térképének megrajzolása viszont óriási jelentőségű volt. A nagy szögtávolságokon is fellépő korreláció kimutatása azért is volt fontos, mert a standard kozmológiai modellek szerint azon tartományok „rezgéseit”, amelyek a semleges hidrogén kialakulása (rekombináció) idején több fok szögtávolságra voltak egymástól, elvileg nem lehettek volna egymással kauzális kapcsolatban, hiszen az ősrobbanástól a rekombinációig nem telt el elég idő ahhoz, hogy akár fény-, akár hangrezgések útján kommunikáljanak egymással. Ilyen kommunikáció a számítások szerint csak mintegy 1° -os szögeltérésekig lehetséges. Erre az ellentmondásra csak a 80-as évek elején kifejlesztett felfűvódás- (infláció-) elmélet adott magyarázatot, amely szerint a nagyon korai Univerzum igen rövid idő alatt exponenciálisan kitágult, és a közös, tágulás előtti múlt teremtett kauzális kapcsolatot a később már külön fejlődő tartományok között. Ebből viszont az következik, hogy a mikrohullámú háttérsugárzás világunk rekombináció-kori, sőt nukleoszintézis-kori állapotánál sokkal régebbi történésekről is hordozhat információt. Ez az információ azonban jól el van rejtve, és a hozzáférés sok további mérést és számítást igényel.

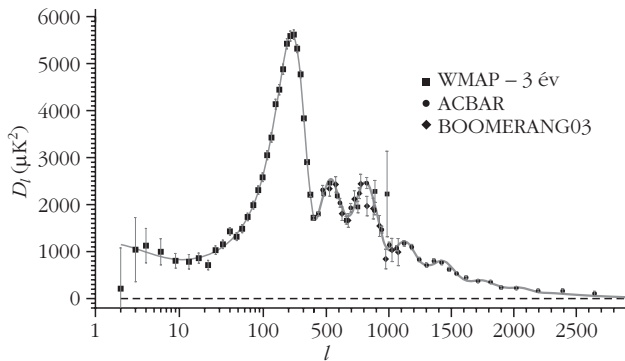
A COBE mindkét kozmológiai műszerének vezető kutatója, *George Smoot* és *John Mather*, eredményeikért 2006-ban Nobel-díjat kaptak.

Kisszögű korrelációk és WMAP-eredmények

A COBE után egy sokkal érzékenyebb és jobb szögfelbontású detektorokkal felszerelt szonda, a 2001-ben pályára állított Wilkinson Mikrohullámú Anizotrópia Szonda (WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) következett. Neve emléket állít David Wilkinsonnak, aki *Charles Bennett*-tel együtt készítette elő a WMAP missziót, de 2002-ben elhunyt. A WMAP műszerei megerősítették a COBE lecsatolódás kori hőmérsékleti térképének helyességét, de jobb szögfelbontásuk miatt sokkal több részletet tártak fel. Az új szonda által mért szögkorrelációs függvény is sokkal kisebb szögtávolságokig megbízható. A szögkorrelációs módszer némileg emlékeztet a Föld és a Nap belső szerkezetének szeizmológiai vizsgálatára, bár a háttérsugárzásba befagyott rezgési módusok időbeli változása túl lassú a mi időskálánkhoz képest, ezért csak iránybeli korrelációkat tudunk mérni.

A szögkorrelációs függvény helyett általában annak Fourier-transzformáltját, illetve gömbi geometria esetén gömbfüggvények szerinti kifejtését használják. A háttérsugárzás fluktuációiról feltételezik, hogy négyzetes várható értékük csak a bezárt szögtől, illetve az azzal ekvivalens l multipólus-paramétertől („kvantumszámától”) függ, az irányt jellemző m paramétertől nem. Míg a COBE gyenge szögfelbontása miatt homályban maradt a csak a felfűvódás után kauzális kapcsolatba került ősi tartományok közötti korreláció, a WMAP műszerei már ezt is mérik. A mintegy 380 ezer évvel az ősrobbanás után végbemenő rekombináció (fotonok lecsatolódása, hidrogénatomok kialakulása) előtt a forró plazmában a hangsebesség jó közelítésben $c/3^{1/2}$ volt, ahol c a fénysebesség. Így az igen korai perturbációk (a későbbi rezgések csirái) hangsebességgel terjedve legfeljebb mintegy 220 ezer fényév távolsáig fejthették ki hatásukat a fotonok lecsatolódása előtt. Az, hogy ma ezt az ősi „mérőlécet” milyen szög alatt látjuk a háttérsugárzásban, és ez hogyan jelenik meg a fluktuációk teljesítményspektrumában, az Univerzumunkat leíró kozmológiai paraméterektől függ. A spektrum első maximumának helyéből elsősorban a háromdimenziós tér görbületére, s egyben az Univerzum tömegsűrűségére következtethetünk. Ennek alapján kiderült, hogy a térgörbület lényegében zérus, vagyis háromdimenziós terünk euklideszi. A maximumok és minimumok helye (l -értéke) és amplitúdója alapján más paramétereket is meghatározhatunk, de ezek értékének hibája attól is függ, milyen paraméterezésből indulunk ki. A teljes paraméterrendszer diszkussziójától, valamint a becslési módszerek és az elméleti háttér tárgyalásától itt eltekintünk, de az 5. ábrán bemutatjuk, hogy a WMAP és két más jó szögfelbontású műszer mérési eredményei milyen jól illeszkednek a mindössze 6 becsült paraméterrel számolt elméleti görbére.

A WMAP szonda mérési eredményeit és az azokon alapuló kozmológiai paramétereket először 1, majd 3 éves adatok alapján publikálták, végül idén márciusban megjelentek az előzetes dolgozatok az 5 éves



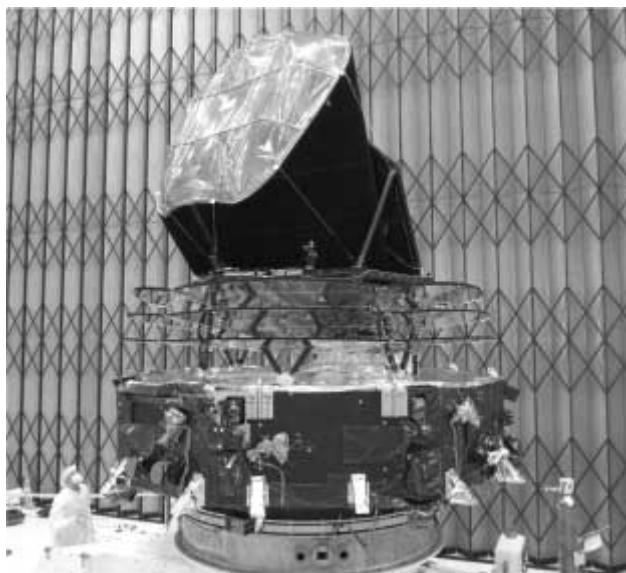
5. ábra. A hőmérséklet-korrelációk teljesítményspektruma

mérési eredményekről is [6]. A főbb paraméterek értéke ugyan nem sokat változott a korábbiakhoz képest, de a jobb kalibráció és nagyobb statisztika néhány területen fontos előrelépést tett lehetővé. Szignifikánsan sikerült kimutatni a neutrínó-háttérsugárzás létezését, amelyre eddig csak elméleti indikáció volt. Emellett a korábbiaknál sokkal pontosabb adatokat sikerült kapni arra, hogy a foton-háttérsugárzás polarizációja kicsiny ugyan, de nem zérus, és az égbolt egy elég gyenge felbontású polarizációs térképét is sikerült elkészíteni.

Hol tartunk ma, és mi várható?

Elsősorban a COBE- és WMAP-szonda eredményei mutatták meg, hogy a mikrohullámú háttérsugárzás ma a kozmológia legfontosabb információforrása. A sugárzás igen pontos Planck-spektrumának kimérése után a legnagyobb erőfeszítést a kis hőmérsékletfluktuációk korrelációs, illetve teljesítményspektrumának mérésére fordították. Igen fontos további információ várható a teljesítményspektrum még pontosabb és

6. ábra. A Planck-szonda Noordwijkben, az Európai Űrügynökség hollandiai telephelyén. A szonda fellövését 2008 végére vagy 2009 elejére tervezik.



kisebb szögekre kiterjedő mérésétől, valamint a polarizációs mérésektől. A polarizáció az elméletek szerint több forrásból származik, és különösen fontos lenne az úgynevezett B-típusú, örvényes komponens megtalálása, mivel ez az ősi forrásokból származó gravitációs sugárzás létét is igazolná. Azonban a sokféle előtérforrás miatt ez igen nehéz feladatnak látszik.

A kozmikus háttérsugárzás méréseinek értelmezésénél fontos szerep jut a távoli szupernóvák megfigyelésének és a galaxisok, galaxishalmazok vöröseltolódása mérésének és iránykorrelációjuk meghatározásának is. A kozmikus szerkezetképződésre vonatkozó adatok jó összhangban vannak a háttérsugárzás-mérésekkel, de a kozmikus csomósodások kései, nemlineáris fejlődése bonyolult modellvizsgálatokat igényel, és nem vezethető le egyszerűen a háttérsugárzásban is tükröződő korrelációkból.

Azt, hogy az Univerzum ma gyorsulva tágu, 1998-ban a távoli szupernóvák vártnál kisebb fényessége alapján fedezték fel, és nem a háttérsugárzás adataiból. Ma valamennyi megfigyelés összhangban van azzal, hogy a barion-alapú „közönséges” anyag az átlagos tömegsűrűségnek legfeljebb 5%-át teszi ki, míg az ismeretlen részecskékből álló hideg, sötét anyag mintegy 22%-ot, az Univerzumban lényegében egyenletesen eloszlott és Einstein kozmológiai állandójával hasonló viselkedést mutató sötét energia pedig 73%-ot. A CERN idén induló nagy hadronütköztetője (LHC, Large Hadron Collider) talán segít valamit legalább a sötét anyag azonosításában, de az is lehet, hogy még tovább bonyolítja a képet. Hasonló várakozások vannak az elemi rész-fizika iránt az Univerzum korai felfűvődési időszakának megértésével kapcsolatban is.

A háttérsugárzás polarizációs szerkezetének és a spektrum feketetesttől való kis eltéréseinek vizsgálatában sokat várhatunk a Max Planckról elnevezett szondától, ami rövidesen megkezdte működését (6. ábra). Érzékenységében, szögfelbontásában és különösen polarizációs mérési pontosságában a korábbiakhoz képest nagyságrendnyi előrehaladás várható. És ez lesz a háttérsugárzást vizsgáló első olyan szonda, amely nagyrészt európai együttműködésben épült.

A feketetest-sugárzásnak kulcsszerepe volt a kvantummechanika őskorában, és Planck aligha gondolhatta volna, hogy egy évszázaddal később ismét kulcsszerepe lesz a mikro- és makrovilág együttes megértéséért folyó kutatásokban.

Irodalom

1. Max Planck: Über Irreversible Strahlungsvorgänge, Fünfte Mittheilung (Schluss). *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin* (1899) 440–480.
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Olbers'_paradox
3. R.A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow: The origin of chemical elements. *Phys. Rev.* 73. (1948) 803–804.
4. Steven Weinberg: *Az első három perc*. Gondolat, Budapest, 1982. (Eredeti: *The first three Minutes. A modern view of the origin of the Universe*. Basic Books, New York, 1977.)
5. Fényes Tibor: Az Univerzum uralkodó anyagfajtája, a „sötét anyag”. *Fizikai Szemle* 58/3 (2008) 81.
6. E. Komatsu et al.: Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation. arXiv:0803.0547v1 [astro-ph], 4 March 2008.

AZ ENERGIAMEGMARADÁS TÖRTÉNETÉHEZ

Julius Robert Mayer a 19. század Galileije vagy dilettáns fizikus?

Martinás Katalin
ELTE TTK

Egyetemista korom óta izgatott *Robert Mayer*. Ténylegesen mit és hogyan fedezett fel? Szokásos zanzásított életrajza szerint észrevette, hogy a hajósok vénás vére a trópusokon élénk piros, ebből rájött, hogy az erő (energia) megmarad. Cikkét először elutasították, később a konzervatív tudósok (a hőanyagelmélet hívei) e felismerése miatt elmeogyintézetbe zárták. Számomra ez a történet lehetetlennek tűnt.

A mostani tankönyvek az állandó nyomású és állandó térfogatú fajhő arányból történő hő-munka egyenérték számítását említik. Egy fizikát nem tanult orvostól ez szép, de érthetetlen.

Pár évvel ezelőtt *Ropolyi László*val Robert Mayerről azt írtuk *Simonyi: A fizika kultúrtörténete* alapján [1], hogy elképzelése azért nem válhatott népszerűvé, mert azt a romantikus természetfilozófia szellemében fejtette ki [2]. Nemrég megtaláltam magyarul két részletes Robert Mayer-életrajtot: *Czögler Alajos* művét [3] és *Wilhelm Friedrich Ostwald* írását [4]. Ezen kívül 2008-ban közelebből megismerkedtem a romantikus természetfilozófiával [5]. Ezek együtt érthetőbbé teszik Robert Mayer életét és munkásságát. A romantikus természetfilozófia nemcsak formailag jelent meg Mayer műveiben, hanem ez a szemléletmód tette lehetővé az energia megmaradásának és magának az energiának a felismerését. Mayer rájött, hogy a természetfilozófiai megközelítés egységes szemléletmódjában szereplő metafizikai „erő” (energia) lehozható a Földre, kiszámítható, és egy új fizikát (mai szóhasználatlaltal a termodinamikát) kapunk.

Mayer felfedezése: az erő megmaradása

Robert Mayer (1814–1872) autodidakta fizikus orvosnak készült. Az egyetemen nem is tanult fizikát, mert éppen akkor, amikor a tübingeni egyetem hallgatója volt, a fizikaprofesszori állás nem volt betöltve. Híres felismerése után nagyon rövid idő alatt sajátította el a szükséges ismereteket barátai, elsősorban a radikális teológus, *Baur* segítségével.

1840-ben hajóorvosként Jáva felé utazott egy holland hajón, amikor megfigyelte, hogy a matrózok vénás vére a trópusokon vörösebb, mint a mérsékelt égöv alatt. Arra következtetett, hogy a szervezetben ilyenkor kisebb mértékű oxidációs folyamat zajlik le, minthogy az életműködéshez szükséges hő egy részét a természet szolgáltatja, és ez csökkenti a vénás és artériás vér közötti színbeli különbséget. Innen eljutott ahhoz a gondolathoz, hogy az élelmiszer oxidációjából származó kémiai energia, a test hője, és az emberi test által végzett munka egymásba átalakíthatók, s eközben az erő (energia) nem vész el, nem is keletkezik, csak átalakul.

Mai ismereteink, fogalmaink alapján nehéz követni felismerését. Az energia köznapi szó lett, és már gyerekkorban megtanuljuk *az energia nem vész el, csak átalakul* frázist. A fizika (termodinamika) története szerint az energia megmaradása a hőanyag (kalorikum) elmélet tagadásával alakult ki. Ez a folyamat nehezen alkalmazható Mayer esetében. Valószínűleg nem is ismerte a hőanyagelméletet. Ha ismerte volna, akkor segítségével megmagyarázhatta volna a jelenséget. A kalorikumelmélet alapján a hő „anyag”, amely egyik testből a másikba áramlik a hőmérséklet-különbség hatására. A munkával (dörzsöléssel) keletkező hőt úgy értelmezték, hogy ekkor a környezetből viszünk be hőt a testbe. *Sadi Carnot* ezzel a képpel írta le a gőzgép működését. Így a vér színének megváltozása értelmezhető lett volna egy, a Carnot-éhoz hasonló gondolatmenettel.

Czögler Alajos így összegezte Mayer munkásságát és felfedezését [3]:

„Egy oly törvénynek a fölkeresése, melynek szigora alól egy természeti tüneményt sem lehet kivonni, a legméltóbb tárgya lehetett az olyan tudománynak, mint a milyen a fizika. Hogy ez a tárgy, mely most, miután feltaláltatott, olyan nagyon egyszerűnek látszik: mégis egyike volt a legnehezebbeknek, arról meggyőzően tanúskodik az a körülmény, hogy feltalálása csak a fizika egyes ágainak nagy kifejlődése után sikerült, hogy e találmányt a tünemények benső összefüggését kimutató experimentális és raczionális bűvülatok nagyszámú speciális eredményeinek kellett megelőzniük.

Az erő megmaradása elvének felállítása a Mayer halhatatlan érdeme. Ez az elv, mely nem csupán a fizikára, hanem a természettudományok valamennyi ágára új fényt vala derítendő, egyike a legnagyobb tényeknek, melyekkel a fizika Galilei óta gazdagodott, mert míg egyszerűen ezen elv által az ismert tények elvies jelentőségű törvényei általános igazságnak alárendelt, de egymással – éppen ez általános igazság következményei által – szorosan összefüggő tagjaivá lettek, másrészt ez az elv maga is a speciális bűvülatok új mezejét nyitotta meg, oly mezejét, mely emez alapigazság nélkül, mint a föltétlen kiinduló pont nélkül, eddig sem vala, s ezután sem lett volna átkutatható. A Mayer megnyitotta mezőnek teljes megmívelése még sok nemzedék munkáját fogja igénybe venni.”

Az erő fogalma a 19. században

Robert Mayer szerepét és munkásságát csak akkor érthetjük meg, ha történelmi perspektívában vizsgáljuk. Mayer az erő megmaradásáról beszélt. Az erő a mai szóhasználatban egyértelműnek tűnik: A newtoni erő az impulzus (lendület) vektorának idő szerinti

differenciálhányadosa, megmaradása nem értelmezhető. Az erőnek a mai jelentése csak a 19. század második felében terjedt el. A század közepéig egy diffúz fogalom volt, amely talán a változóképességnek feleltethető meg. Sok mindent jelentett, és nagyon sok szót használtak hasonló jelentésben. A problémát természetesen felismerték. *David Hume* már 1740 körül így jellemezte a fogalomzavart: „I begin with observing that the terms efficacy, agency, power, force, energy, necessity, connexion and productive quality, are all nearly synonymous.” Sajnos, nem ismerek olyan 18. századi magyar nyelvű művet, amely ezzel a problémával foglalkozott volna, ezért a fenti mondat hiteles fordítását nem tudom megadni, a modern fordítás pedig már a mai szóhasználatot tükrözné. A fordítás helyett inkább egy összefoglalást adok az általam ismert jelentésekből:

Mai fogalmakkal kifejezve a régi *erő* fogalmat, legalább ötöt azonosíthatunk. Ezek

- a newtoni vonzó-taszító erő;
- a hajtóerő (kémia, termodinamika) – a különbségekből eredő változtatás képessége;
- az impulzus (lendület) – elsősorban a skolasztikában és a kartézianusoknál;
- a megmaradó energia;
- a felhasználható energia (exergia) – amely nem teremthető, átadódik és disszipálódik.

Az erőfogalom a tudomány történetében

Arisztotelész szerint a világot felépítő négy őselem a tűz, a víz, a levegő és a föld. A dolgok természetét kialakító alapvető aktív minőségek, szervező elvek a meleg és a hideg. Ezek egyszerre szerepelnek szervező elvekként és konkrét termikus hatásaikkal is: például a meleg melegségénél fogva meggyógyíthat (rendbe tehet) beteg testrészeket. Tehát általában nem pusztán elvont elvekként működnek, hanem nagyon konkrétan is. Az *Arisztotelész*-féle tűz nem elsősorban éget, hanem inkább a mai hő, energia és *exergia* fogalmak antik megfelelője. Az irreverzibilitás világnézeti és termodinamikai szerepének összekapcsolódására talán a legszebb példa a mozdulatlan mozgató (vagy a hőhalál) problémája.

Az arisztotelészi rendszerben a természetes mozgások eredménye egy egyensúlyi helyzet volna, például a felhőkben lévő víz nehéz természete miatt eső formájában leesik, a tengerbe jut. De nem marad ott, ugyanis a Nap ismét elpárologtatja. De mi mozgítja ezt a mechanizmust, honnan ered a Nap melege? A Nap mozgatóerejét a szférák súrlódása révén szerzi, s így képes a vizet elpárologtatni.

De mi tartja fenn ezt a mechanizmust, honnan származik a szférák mozgása? A szférák egymáson súrlódó mozgását az első szféra mozgása váltja ki, amelyik viszont közvetlenül a mozdulatlan mozgató beavatkozására jön létre. Vagyis: a természetes mozgások révén kialakuló egyensúly folytonosan megbomlik a mozdulatlan mozgató állandó beavatkozása miatt. A



Julius Robert Mayer

mozdulatlan mozgató akadályozza a stabil egyensúly beálltát, a rendet folytonosan összezavarja, állandó keletkezésre készíti. Ez egy entropikus Isten: éles ellentétben áll a 17. és 18. század mechanikus Istenével, aki majd a rend létrehozójaként a nagy konstruktív szerepét fogja játszani.

Így az arisztotelészi rendszerben nincsen hőhalál, ez egy nyílt rendszer. A mozdulatlan mozgató ilyen módon való bevezetésével *Arisztotelész* rendszerét logikailag zárttá, fizikailag, energetikailag pedig nyílttá tette.

Történetileg a skolasztikánál kezdhetjük a középkor leírását, ahol még minden mozgót valami mozgató. Az eldobott tárgyat az impetus (impulzus) mozgítja. Az impetuselmélet első megfogalmazását a hatodik századi alexandriai filozófus, *Philoponosz Grammatikosz* adta. A skolasztika szerint minden egyes „erő” mozgása közben „elhasználódik”, csak addig képes bármit is mozgítani, amíg el nem használódik – az impetus (impulzus) mozgás közben elfogy.

Descartes-nál a természet törvénye az impetusmegmaradás formájában jelenik meg, amely az impulzusmegmaradás proto-megfogalmazásának is tekinthető, mivel az irány nem (csak az $m \cdot v$ abszolút értéke) jelenik meg. *Descartes* a tömeg és a sebesség szorzatát tekintette impetusnak. Érdekes, hogy Mayer a legelső változatban, amelyet a *Poggendorff Annales*-ébe küldött be, szintén az impetusmegmaradás alapján érvelt. Erre a dolgozatra azonban még választ sem kapott. Az impulzusmegmaradás törvényét *Newton* fogalmazta meg; a III. axióma, a hatás-ellenhatás törvénye azt jelenti, hogy kölcsönhatásban a teljes impulzus nem változik. A modern fizika az impulzusmegmaradást a Világegyetem eltolás invarianciájával kapcsolja össze.

Leibnitz a *vis viva* és a *vis mortua* fogalmát vezette be – ezt szokás a proto-energiafogalomnak tekinteni. A *vis viva* a tömeg és a sebesség négyzetének szorzata. (A kettes osztó lényeges koncepcionális különbséget jelent.) A *vis viva* változása nem kapcsolható össze a munkavégzéssel. A munka fogalma a fizikában csak 1830-ban, *Coriolis* művében jelent meg, aki megmutatta, hogy a kinetikus energia megváltozása megegyezik a munkavégzéssel.

A mechanikai energia megmaradását, mint matematikai eredményt (integrációs állandót) felismerték, de a fizikusok számára nem volt fontos. Ahogy a munka, ugyanúgy a mechanikai energia is megjelent a matematikai eredményekben, de nem kapott önálló nevet. A fizikusok nem foglalkoztak a metafizikai problémával, az univerzális megmaradó mennyiség kérdésével.

Joseph Black 1770-ben felismerte, hogy a hőközlés mérhető, bevezette a fajhő fogalmát, és ezzel megalakította a kalorimetriát, amelynek elméletét *Lavoisier* dolgozta ki részletesen. A vizsgált jelenségekben hőátadás történt, ezért a jelenségek magyarázatára *Lavoisier* a kalorikum (hőanyag) elméletet javasolta. A termikus jelenségek magyarázata így hasonló lett az elektromos jelenségekéhez. Érdekességként érdemes megjegyezni, hogy a termodinamika elnevezés is ezt a szemléletet tükrözi: a termikus (hő) jelenségek vizsgálatát sugallja a név, nem a természet fenomenológus leírását, amely pedig a tényleges tartalma.

Az energiamegmaradás

Az energiamegmaradás felismerése a metafizikai és a fizikai eredmények egyesítéséből származott. *T. S. Kuhn* 1959-ben írt *Az energia-megmaradás, mint példa a szimultán felfedezésre* című cikkében rámutatott arra, hogy az energiafogalom megszületése három különböző folyamat együttes eredménye.

Először is volt az angol út: a hő – munka – elektromosság átalakítása törvényszerűségeinek vizsgálata, *James Prescott Joule* (1818–1889) mérései, *Thomson* (a későbbi *lord Kelvin*) munkássága és *Rankine* eredményei, akinek az energia szó elterjedése köszönhető. Az erő (energia) megmaradás állt a középpontban. Idézem *Joule* fajhős cikkének kezdetét: „Believing that the power to destroy helongs to the Creator alone, I entirely coincide with Roget and Faraday in the opinion that any theory which, when carried out, demands the annihilation of force, is necessarily erroneous.” (Abban a hitben, hogy a pusztítás ereje egyedül a Teremtő birtoka, teljességgel egyetértek Roget-val és Faraday-jel azon véleményüket illetően, hogy bármely elmélet, amely a gyakorlatba ültetve az erő megsemmisítését kívánja meg, szükségszerűen téves.)

Joule gondos méréseivel meghatározta a hő-munka egyenértéket, és megmutatta, hogy a kalorikumelmélet jóslatával szemben a munka-hő átalakítás nem függ a hőmérséklettől, hanem egy univerzális állandó. Tiszteletünk jeleként róla neveztük el az energia mértékegységét, és így – a mai egységekkel – *Joule* gon-

dos méréseinek eredménye: 1 joule munka melegítő hatása megegyezik egy joule hő melegítő hatásával. Eredményei nem keltek érdeklődést egészen addig, amíg *Kelvin* közvetítésével a német eredmények az erő megmaradásáról meg nem érkeztek Angliába. *Joule*-nál hiányzott a metafizika, és mérései egy speciális eredményt fejeznek ki, amelyek a számszerű adatok nagy szórása miatt nem voltak meggyőzőek, nem voltak bizonyító erejűek.

Másodszor ott volt a racionális francia mérnöki iskola, amelynek egyik célkitűzése a lehető legjobb gép készítése volt. Először a vízi erőgépek elvi működését vizsgálták. Elsősorban *Nicolas Carnot* nevét kell megemlíteni, a hőerőgépek elemzését már fia, *Sadi Carnot* végezte. Ez a kutatás vezetett a perpetuum mobile lehetetlenségének kimondásához (1775) és a körfolyamatok vizsgálatához. Meg kell még említeni *Coriolis* és *Poncelot* nevét, akik bevezették a munka fogalmát a fizikába, és megadták a mozgási energia megváltozása és a munkavégzés a kapcsolatát.

Sadi Carnot a hő-munka átalakítást vizsgálta, és annak a feltételezésével, hogy a hő megmarad, (azaz a magasabb hőmérsékletű helyről átmegy a hidegebbre) és perpetuum mobile nem készíthető, megmutatta, hogy a maximális munkavégzés csak a hőmérsékletektől függ. Talán a mai szóhasználattal azt kellene mondanunk, hogy *Carnot* „mozgató ereje” az exergia volt.

Harmadszor volt a metafizika, a német út, amely az élő szervezetekben lejátszódó folyamatok vizsgálatából indult ki. Két főbb irányzat emelhető ki: a *vis vitalis* elmélet, amely szerint a fizika és kémia törvényei az élő szervezetekre nem érvényesek, valamint a természet egységét valló romantikus természetfilozófia. Az általános erő – a természeti hajtóerő – megmaradását, mint a természet egységének kifejezőjét érett formában a romantikus természetfilozófia fogalmazta meg. *Schelling* a természetet egyetlen szellemi princípium megnyilvánulásának tartja, amely a maga képére formálja az anyagot. Minden természeti forma ugyanahhoz a mintához, ideálhoz közelít.

Robert Mayer és *Hermann Helmholtz* ugyan más úton közelítették meg, de ugyanazt a kérdést, az állati hő eredetét vizsgálták. Mindketten orvosi egyetemet végeztek, és a felismerés idején ténylegesen orvosként dolgoztak. *Mayer* a későbbiekben is megmaradt orvosnak, *Heilbronn*-ban volt főorvos, míg *Helmholtz* később fizikaprofesszor lett. *Helmholtz* munkája 1847-ben jelent meg *Über die Erhaltung der Kraft* címmel. *Helmholtz* stílusán is érződik a romantikus természetfilozófia hatása, de tárgyalásmódja már teljesen fizikusi.

Mayer érdeme a metafizika és a fizika egyesítése. Felismerte, hogy az erő mérhető, kvantitatívan jellemezhető. A felismerés folyamata *Mayer* megfogalmazásában:

„1840 nyarán a Jáva szigetére újonnan megérkezett európaiakon végrehajtott érvágásoknál azt tapasztaltam, hogy a kar vénájából eresztett vérnek majdnem kivétel nélkül föltűnően vörös színe volt. Ez a jelenség magára vonta teljes figyelmemet. Kiindulván a

Lavoisier égés-elméletéből, mely az állati hőt égés-folyamatnak tulajdonítja, azt a kettős színváltozást, melyet a vér a kicsiny és a nagy körfutás hajszáledényeiben szenved, úgy tekintetem, mint a vérrrel végbemenő oxidációnak érzékileg észrevehető jelét, látható reflexusát. Az emberi test állandó mérsékletének megtartására kell, hogy annak hőfejlesztése a hővesztésével, tehát a környező médium mérsékletével is szükségképpen bizonyos értékviszonyban álljon s ennél fogva kell, hogy mind a hőtermelés és az oxidáció-folyamat, mind pedig mind a két vérnemnek színtkülönbsége a forró égőv alatt egészben véve kisebb legyen mint a hidegebb vidékeken.”

1842-ben közölt írásában,¹ amely a vegyész *Liebig* által szerkesztett évkönyvben jelent meg, nem hivatkozik filozófusokra, de a német romantikus természetfilozófia szemléletmódjának hatását egyértelműen felfedezhetjük. Mayer értekezése megpróbál megfelelni ama kérdésre, hogy mit értünk erők alatt, és hogy ezek egymással hogyan függnek össze. Mayer arra törekszik, hogy az erő fogalmát ép oly szabotossá tegye, mint az anyagét. Egy részlet a 42-es cikkből:

„Az erők okok, és így azokra teljes mértékben alkalmazható az alaptétel: *causa aequat effectum*. Ha a *c* ok okozata *e*, akkor $c = e$; ha *e* ismét az oka egy másik *f* okozatnak, akkor $e = f$ stb. $c = e = f \dots = c$. Az okok és okozatok egy láncolatában, mint ahogy az egy egyenlet természetéből következik, sohasem válhat egy tag vagy egy tag egy része nullává. Minden ok első tulajdonsága tehát az elpusztíthatatlansága.

Ha az adott *c* ok létrehozta a vele egyenlő *e* hatást, ezzel *c* egyúttal megszűnt létezni; *c* tehát *e*-vé vált. Ha *e* létrehozása után *c* egészen vagy részben még megmaradt volna, úgy ezen visszamaradó oknak további okozat kellene hogy megfeleljen; *c* okozata tehát *e* kellene hogy legyen ellentétben $c = e$ feltevésünkkel. Így, minthogy *c* *e*-be, *e* *f*-be stb. megy át, ezeket a mennyiségeket egy és ugyanazon objektum különböző megjelenési formáinak kell tekintenünk. Az a képesség, hogy különböző formákat tud felvenni, a másik lényeges tulajdonsága minden oknak. A két tulajdonságot összefoglalva mondhatjuk: az okok kvantitatíve elpusztíthatatlanok és kvalitatíve változékony objektumok.”

Ez a rész ma nehezen érthető, de akár Schelling is írhatta volna. Mayer ezzel meghatározta az erők (energia) fő tulajdonságát: átalakulhatnak és elpusztíthatatlanok.

„A természetben az okok két nagy osztálya létezik, amelyek között a tapasztalat szerint nincs átmenet. Az egyik osztályt azok az okok alkotják, amelyek ponderábilisak és impenetrábilisak: az anyagok; a másik osztályt azok az okok teszi ki, amelyeknél hiányoznak ezek a tulajdonságok: az erők ... Az erők tehát: elpusztíthatatlan, változékony, imponderábilis objektumok.

Az esési erő, a mozgás és hő között fennálló természetes összefüggést az alábbi módon tehetjük szemléletessé: tudjuk, hogy a hő úgy lép előtérbe, hogy a test egyes anyagrészei egymáshoz közelebb igyekeznek; az összenyomás hőt fejleszt; ami most már a legkisebb anyagrészekre és a köztük levő legkisebb térre igaz, alkalmazható kell, hogy legyen nagy tömegekre és mérhető térrészekre is. Egy teher süllyesztése a Föld számára tényleges térfogatcsökkenést jelent, minden bizonnyal kapcsolatban kell, hogy álljon az ilyenkor fellépő hővel; ennek a hőnek a teher nagyságával és a távolságával pontosan arányosnak kell lennie.”

Ez a rész a zseniális autodidakta írása. Az érvelés nem felel meg a mai ismereteinknek, de a végeredmény jó. Mai megfogalmazásban a helyzeti energia alakul át ilyenkor hővé, és ténylegesen a hőhatás a tömeg és a magasság szorzatával arányos.

„Téziseinket, amelyek szükségszerűen következnek a »causa aequat effectum« alaptételből, és amelyek tökéletes összhangban állnak az összes természeti jelenséggel, egy gyakorlati következtetéssel zárjuk ... meg kell határoznunk, hogy milyen magasra kell a Föld felszíne fölé emelni egy meghatározott súlyt, hogy az esési ereje ekvivalens legyen az azonos súlyú vízmennyiség 0-ról 1 °C-ra való melegítésével. Hogy egy ilyen egyenlet a természetben gyökerezik, tekinthető az eddigiek rezüméjének.”

Ez a mérés így kivitelezhetetlen, de Mayer megtalálta a kiszámítás módját.

„A gázokra vonatkozó ismert hő- és térfogatviszonyok alkalmazásából ... az atmoszferikus levegő állandó nyomáson és állandó térfogaton mért kapacitásának hányadát 1,421-nek véve, az adódik, hogy egy súly lesüllyedése körülbelül 365 m magasságból megfelel egy hasonló súlyú víz 0-ról 1 °C-ra való melegedésének.”

A helyes (pontos) eredmény 418 m. A számítás eredménye csak azért téves, mert pontatlan adatokból indult ki.

Az egyenértéket kifejező szám tette föl Mayer eszméire a koronát. Enélkül az egész elmélkedés metafizika maradt volna, ettől viszont fizika lett. Mayer felismerése, hogy a metafizikai „erő” állapotjelző és mérhető, kiszámolható. A természet egysége a „mozgató erő” átalakíthatósága, és nem teremthetősége.

(Művének nem volt visszhangja, de szerencsére testvére, aki patikus volt, támogatta. A későbbi műveit saját költségén adta ki.)

Közelebb jutunk a megértéshez, ha a Baurhoz írt levelének a vonatkozó részét olvassuk (a levél a gyűjteményes kiadásban található, *Gesammelten Schriften* 1867, 1874 Stuttgart):

„A vegyésznek az az alapelv az irányítója, hogy maga a »szubsztancia«, az anyag lényege elpusztíthatatlan, és hogy az alkotóelemek a létrejött összetétellel a legszükségesebb vonatkozásban állanak; ha H és O eltűnik (minőségileg elértéktelenedik) és HO lép fel, a kémikusnak nem szabad azt feltételeznie, hogy H és O tényleg semmivé lett, s HO véletlenül és kívülről kép-

¹ Robert Mayer: (Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur [Megjegyzések a szervetlen természet erőiről] *Annalen der Chemie und Pharmacie* 43 (1842) 233.



Megjegyzések a hő mechanikai egyenértékéről, 1851.

zódott; ennek a tételnek szigorú érvényesítésén épül fel az újabb kémia, amely nyilvánvalólag csak így vezethetett határozott eredményekhez. ... Az erőkre [energiákra] is ugyanezeket az alapelveket kell alkalmaznunk; szintén elpusztíthatatlanok, mint a szubsztancia, szintén kombinálódnak egymással, régi alakjukat elvesztik (mennyiségileg semmivé lesznek), új formában lépnek fel s a régi [valamint] új formák összefüggése épp oly lényeges, mint a H és O, valamint a HO között. Az erők (amelyeknek szigorúan tudományos kifejlődését nem fogom magyarázatlanul hagyni) mozgásból, villamos-ságból és melegből állanak.”

Mayer felismerése az első főtétel, az energia megmaradása. Az a fontos többlet Schellinghez képest, hogy kvantitatív összefüggés van a változások között. Mai szóhasználatlálva, felismerte, hogy az erő (energia) állapotjelző. Felismerte, hogy egy szigorú könyvelővel van dolgunk; csak olyan változások mehetnek végbe, amelyekre a megmaradás teljesül. Megsejtette a

$$dU = dQ + dL$$

formát, és ehhez megtanulta a fizikai alapokat.

Elméletének bizonyítéka (következménye) a hő egyenérték meghatározása. Először a leeső test (víz) melegedésével tervezte a meghatározást, azután meg-

ismerte *Gay-Lussac* eredményét, hogy a vákuumba kiterjesztett gáz hőmérséklete nem változik. Ebből levonta következtetést, hogy a gáz fajhője nem függ a sűrűségtől, és így az állandó nyomású és az állandó térfogatú fajhők arányából az egyenérték meghatározható.

Az organikus mozgás az anyagváltozással kapcsolatban; természettudományi tanulmány című könyvében² található az energia ismeretes alakjainak első táblázatos kimutatása, valamint arra való utalás, hogy a földön elhasznált minden energia a Nap sugaraiból ered, és a növényekben kémiai energia alakjában halmozódik fel. Itt is megtalálhatók teljesen szakszerűen és világosan azok az alapelvek, amelyek szerint a tápanyagok kémiai energiája az állatok és emberek minden tevékenységének általános energiaforrásául tekintendők.

Ugyancsak Mayer végezte az első számításokat abban az irányban, vajon hogyan aránylik az emberek-nél és állatoknál a teljesített mechanikai munka a tápanyagok égési melegéből kiszámítható összes energiavesztéséhez. Mindez *Népszerű tanulmány a világregrendszer dinamikájáról* cím alatt 1848-ban *Landherr*-nél jelent meg Heilbronnban.³

Mayer tragédiája

Mayer kisvárosi polgár volt. Nem szerezhetett magának és gondolatainak rajongókat és tanítványokat. Bátyja támogatta, de a felesége már csak azt látta, hogy a pénzét műveinek kiadására költi. Munkájának első visszhangja Joule támadása volt.

Joule 1843-ban közölte első eredményeit, amelyek 1847-ben már kiérlelt formában jelentek meg, és 1847-ben ismertette ezeket a francia akadémiához benyújtott, és a *Comptes Rendus*-ban megjelent tanulmányában is, ahol nem említette Mayert.

Mayer írását, amelyben elsőségére hivatkozik, közzölték. De Joule 1848-ban megtámadta Mayert. Azt állította, hogy Mayernek 1842. évi értekezése „nem érdemelte meg a tudósok figyelmét”, mert az ő (Joule) kísérletei előtt senki sem tudhatta, hogy a fajhő a sűrűséggel nem változik. Más stílusban ugyan, de Joule is az erő megmaradásából indult ki, és ezt kísérletileg felhasználta az egyenérték kiszámításához. Nem közismert, hogy gázokkal is végzett méréseket.

Mayer a következő, 29. kötetben (1849. nov. 12. szám) elég udvariasan figyelmeztette Joule-t, hogy a fajhő eme tulajdonságát már *Gay-Lussac* kísérletei kétségtelenül eldöntötték. Érdekes, hogy az angol-szász irodalomban ez később is felbukkant, sőt nemrég *P. Mirowski* Mayert, mint a zseniális autodidaktát mutatta be, aki nem tudta, hogy a fajhő függhet is a térfogattól, és így ráhibázott a jó eredményre.

² Robert Mayer: *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel*. Heilbronn, 1845.

³ Robert Mayer: *Beiträge zur Dynamik des Himmels*. Landherr, Heilbronn, 1848.

Helmholtz 1847-ben közölt dolgozatában csak Joule nevét említi, Mayert nem. Mayer talán ezért határozta el, hogy a nyilvánossághoz fordul. 1849-ben az *Augsburger Allgemeine Zeitung*ban is ismertette elméletét *Lényeges fizikai felfedezés* (Wichtige physikalische Erfindung) címen, és leírta, hogy hogyan határozható meg a hő mechanikai egyenértéke kísérletileg. Erre már kapott választ, egy professzor, *Seyffer* írt egy cikket, amelyben Mayert fantasztának nevezte, aki nem érti az igazi tudományt. Aki az angol eszméktől elmaradó dilettáns. Mayer kénytelen volt röpiratot kiadni, mert választ nem közölték. *Megjegyzések a hő mechanikai egyenértékéről* című írása⁴ 1851-ben felfedezésének elméleti fontosságát tisztán és teljesen megvilágítja.

1850 májusában súlyosan megsérült, amikor egy álmatlan éjszakán delíriumos állapotban második emeleti lakásáról az utcára ugrott. A betegséget követő több hónapos pihenés után tudott csak tovább dolgozni.

1851 szeptemberében agyhártyagyulladásra kapott, amelyből ugyan gyorsan felgyógyult, de családja elmeorvosintézetbe záratta, hogy gyógyítsák ki abból a rögeszméből, hogy jelentős felfedezést tett. Ez nem sikerült; 1853-ban elhagyta az intézetet, de ezután sem orvosi praxisát, sem tudományos tevékenységét nem folytatta.

Mayer csak 1862-ben lépett ki újra a nyilvánosság elé, a lázról írt értekezésével (*Über das Fieber*) amely az *Archiv der Heilkunde*ben jelent meg, és lényegében régi szempontjainak újabb és bővített kifejtését foglalja magában.

Az első nyilvános elismerést a baseli természetvizsgáló társaság tiszteletbeli tagjává történt megválasztása jelentette 1858-ban. 1867-ben kiadták összegyűjtött műveit. 1872-ben jelent meg *Dühring A mechanika általános elveinek kritikai története* című könyve, amelyben Mayert az energetika többi művelője fölé helyezte. 1874-ben *Tyndall* lefordította angolra Mayer műveit és megjelentette őket a *Philosophical Magazine*-ban.

Mayer történetét *Dühring* műveiből ismerjük, aki egy érdekes előadásban, majd írásban is nyilvánosságra hozta véleményét, és Mayert a 19. század Galileijének nevezte.

Mayer hatása

A termodinamika kialakulásával egy máig tartó polémia kezdődött a mechanikai hőelmélet és a fenomenológus (axiomatikus) termodinamika között. A vita lényege, hogy az irreverzibilis termodinamika visszavezethető-e a reverzibilis mechanikára. Ebben a megfogalmazásban világos a válasz: aki reverzibilis egyenletekből irreverzibilis megoldást származtat, az más bűnökre is képes.

⁴ Robert Mayer: *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme*. Landherr, Heilbronn, 1851.

A mechanikai hőelmélet célkitűzése volt a newtoni mechanikából leszarmaztatni a főtételeket. Az irányzat nagy sikere a statisztikus mechanika, nagy vesztese a termodinamika. A mechanikai szemléletmódnak megfelelően a fizikában nincs szükség metafizikára, ezért *Planck* csodálatos nemegyensúlyi termodinamikája is teljes érdektelenséggel találkozott. Max Planck önéletrésében leírta, hogy dolgozatát, amely az irreverzibilis termodinamika megalapozásának tekinthető, nem fogadták megértéssel. „A tartózkodás oka valószínűleg a tudományban a század közepe óta – Schelling és Hegel természetfilozófiai munkásságának »köszönhetően« – jelenlévő ellenszenv a spekuláció iránt, amivel az elméleti kutatást is könnyen meggyanúsíthatták.”

Mayer munkásságát, szellemiségét az energetizmus vitte tovább, ez tekinthető a természetfilozófia örökösének [6]. Miután az energetizmus, mint irányzat, Ostwald halálával megszűnt, inkább csak hibáit ismerjük. Például azt, hogy tagadta az atomok létezését. Pedig, ha elolvassuk az eredeti írást [7], akkor látjuk, hogy nem az atomok létezésének tagadása szerepel benne, hanem annak megkérdőjelezése, hogy minden makroszkopikus (megfigyelhető) viselkedés leszarmaztatható-e az atomok mozgásának leírásából, vagy szükség van a fenomenológus leírásra.

„... vajon milyen előnyünk származik abból, ha a természeti jelenségek törvényeit valóban visszavezetjük az energia megfelelő formáinak törvényeire? Először is, ami rendkívül fontos, lehetségessé válik a hipotézisektől mentes tudomány megteremtése. Nem keresünk tovább olyan erőket, amelyek feltevést nem bizonyíthatunk az atomok között, melyek létéről nem szerezhettünk tudomást, ehelyett az eltűnő és a megjelenő energiák fajtája és mennyisége alapján alkotunk véleményt a folyamatokról. [Ezeket] megmérhetjük, és ezzel a módszerrel mindent kifejezhetünk, amit tudni kell. Mindenki, akinek tudományos érzéke szenvedett a tények és hipotézisek ama folytonos összeolvastásától, amelyet a fizika és a kémia ma ésszerű tudományként kínál nekünk, megérti, hogy ez milyen óriási és általános érvényű előny. Az energetika olyan eszközt kínál, ... amelynek révén a természet úgynevezett magyarázatát a jelenségek leírásával helyettesíthetjük.”

Irodalom

1. Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, Gondolat, 1978.
2. Martinás K., Ropolyi L.: A termodinamika korai története. *Fizikai Szemle* 36 (1986) 288–295.
3. Czöglér Alajos: *A fizika története életrajzokban*. II. kötet, Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 1882.
4. Wilhelm Ostwald: *Feltalálók, felfedezők, nagy emberek*. (ford.: Kósa Miklós) Révai, Budapest, 1912.
5. Gurka Dezső: *A schellingi természetfilozófia és a korabeli természettudományok viszonya*. Gondolat, Budapest, 2006.
6. Bognár Gergely: *Energetizmus*. szakdolgozat, Budapest, 2006, <http://martinas.web.elte.hu/bg.html>
7. Wilhelm Friedrich Ostwald: Emancipálódás a tudományos materializmusból. *Science Progress* IV/24 1896., <http://www.kfki.hu/chemonet/hun/olvaso/histchem/mol/ostwald.html>

A VIRTUÁLIS MÉRÉSTECHNIKA KÍSÉRLETI LEHETŐSÉGEI A KÖZOKTATÁSBAN

Kopasz Katalin, Gingl Zoltán, Makra Péter, Papp Katalin
SZTE–TTIK Kísérleti Fizikai Tanszék

„A tudomány akkor kezdődik, amikor elkezdünk mérni,
pontos tudomány mérés nélkül nem lehetséges.”

Mengyelejev

A fizika és a többi természettudományos tárgy oktatásában is kiemelt szerepe van a kísérletezésnek, hiszen ez szemlélteti és igazolja a modellek helyességét, segítségünkre van az érvényességi határok megismertetésében, és így fontos kapcsolatot teremt a tananyag és a valódi jelenségek között. A kísérletezés a diákok számára sokkal érthetőbbé, kézzelfoghatóbbá teszi a gyakran bonyolult, nehezen követhető leírást, törvényeket. Ahhoz, hogy az iskolai fizikatanítás az adott szinten visszatükrözze a tudomány jellegzetességeit, az életkorhoz és a tananyaghoz illeszkedő méréseket kell beépítenünk az oktatásba.

A mérőkísérletek jelentősége megnövekedett az új rendszerű és szellemű érettségi követelmények bevezetésével, amelyekben ez áll:

„A vizsgázónak a követelményrendszerben és a vizsgaleírásban meghatározott módon az alábbi kompetenciák meglétét kell bizonyítania:

- ismeretei összekapcsolása a mindennapokban tapasztalt jelenségekkel, a technikai eszközök működésével;
- egyszerűen lefolytatható fizikai kísérletek elvégzése, a kísérleti tapasztalatok kiértékelése;
- grafikonok, ábrák értékelése, elemzése;
- a napjainkban felmerülő, fizikai ismereteket is igénylő problémák lényegének megértése, a természet- és környezetvédelemmel kapcsolatos problémák felismerése.”

Az emelt szintű fizika érettségi vizsgán ezen túlmenően az alábbi kompetencia is szükséges:

- „a mindennapi életet befolyásoló fizikai természetű jelenségek értelmezése”. [1]

A fizika tanításában a kísérletek között szerepelniük kell mérőkísérleteknek is. Az iskolai tanításban a kísérleti eszközök gyakran elavultak és a mérésekhez tartozó műszerek sem korszerűek. A modern eszközök lehetőség szerinti bevonása a tanórába elengedhetetlen. Ugyanakkor a szűkülő finanszírozás, a korlátozott anyagi lehetőségek miatt utópisztikus az az elképzelés, hogy taneszközügyártótól rendelt készletek segítségével valósítsák meg a méréseket az iskolákban.

Szimulációk, animációk bemutatásához a tanárok egyre gyakrabban vesznek igénybe számítógépet. Részben, mert a fizikatanításnak feladata a modern eszközök, mérési eljárások megismertetése a tanulók-

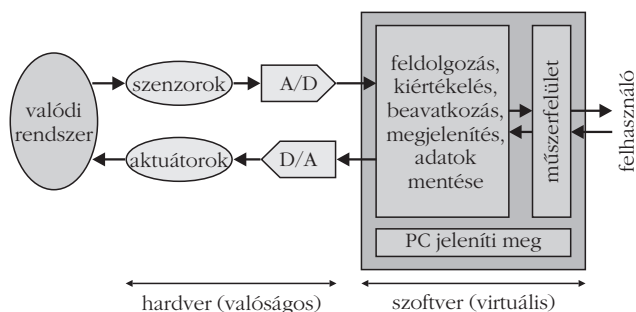
kal, ugyanakkor a számítógép motiváló hatása is jól kiaknázható a számítógépes méréseket alkalmazó tanítás során.

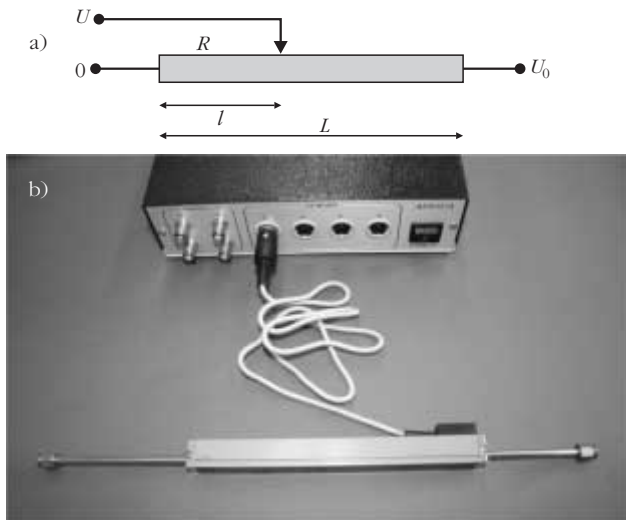
A mai informatikai lehetőségek és a hozzájuk kapcsolódó digitális technika segítségével azonban egyszerűen tehetjük igen hatékonná a kísérletező oktatást: használjunk virtuális méréstechnikát! Ismeretével lehetőség nyílik arra, hogy kevés anyagi ráfordítással a tananyag bármely területéhez kapcsolódva mutassunk be valódi kísérleteket, amelyeknél a mérés és kiértékelés számítógép segítségével történik. Közben a tanulók megismerik a szenzorok működését, és íze- lőtől kapnak a fizikusok munkájából is.

A virtuális méréstechnika lényege, hogy a valódi jeleket (elmozdulás, hőmérséklet, nyomás stb.) szenzorok segítségével elektromos jelekké, majd digitális technika alkalmazásával számokká alakítjuk, így a méréshez kapcsolódó feldolgozás, megjelenítés és más műszerfunkciók már számítógéppel, szoftverekkel végezhetők el [2]. Ilyen módon a valódi méréseket végző műszer szoftveresen „realizálható”, innen ered a virtuális méréstechnika elnevezés.

A megvalósításhoz szükséges számítógép minden iskolában jelen van. A szenzorokat könnyen és aránylag olcsón be lehet szerezni. A hiányzó láncszem a számítógép és az érzékelők kapcsolatát megvalósító analóg-digitális konverziót elvégző adatgyűjtő műszer és a mérő szoftver (1. ábra). A közoktatás számára jelenleg elérhető számítógépes mérőrendszerekhez képest ezt töredékáron meg lehet valósítani, számítógéphez kapcsolásához pedig mindössze egy USB-csatlakozó szükséges. A virtuális műszer működése könnyen átlátható, kevésbé hasonlít fekete dobozhoz, mint az általában használt digitális eszközök.

1. ábra. A virtuális műszer elvi felépítése





2. ábra. Hosszúságmérés feszültségosztással: a feszültségosztó vázlatos rajza (a), valamint a feszültségosztó és az analóg-digitális konvertert végző eszköz (b).

Virtuális műszerek korábban is készültek LabVIEW fejlesztői környezetben, ez azonban meglehetősen költséges. Az alábbiakban bemutatandó műszerekhez C# forráskódot használtunk. A gyorsan megtanulható nyelv előnye, hogy ingyenesen hozzáférhető, és kevés gyakorlás után is képesek lehetünk grafikus felületeken mérőprogramokat készíteni, az elkészült programokból akár megosztható gyűjteményt is készíthetünk. Az iskolai gyakorlatban előforduló számítógépes mérésekkel ellentétben a felhasználók magyar nyelvű programokkal találkozhatnak, ami megkönnyíti a tanórai felhasználásukat.

Informatika és elektronika iránt érdeklődő tanárok kezében a fejleszthető kísérletek határait csak az idő és a beszerezhető szenzorok szabják meg. Ugyanakkor a fejlesztői környezet a programok fordításakor .exe kiterjesztésű fájlokat is készít, amelyeket a jól megszokott módon lehet használni, így a számítástechnikában kevésbé járatos tanárok is bátran felhasználhatják ezeket óráikon.

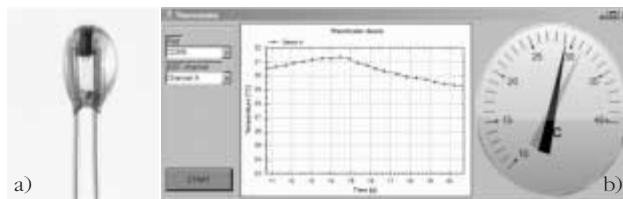
Az alábbiakban a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén fejlesztett eszközökből, kísérletekből mutatunk be néhányat, amellyel illusztráljuk a fentebb említett módszer hatékonyságát.

Hosszúságmérés feszültségosztással

A változtatható értékű ellenállásoknál az ellenállás két vége között egy elmozdítható érintkező (csúszka) található, melynek helyzetétől függ a potenciométer vége és a csúszka közötti ellenállás (2. ábra). A csúszka helyzetének függvényében a mért feszültség értéke is változik [3].

$$R = l \frac{R_0}{L}, \quad U = l \frac{U_0}{L},$$

ahol L a csúszka teljes hossza, l a pillanatnyi helyzete, U a mért feszültség, U_0 az adatgyűjtő által küldött feszültség.



3. ábra. Hőmérsékletmérés termisztorral: a) a termisztor, b) a mérés során a hőmérséklet-idő grafikon mellett a mérőórán a pillanatnyi értéket és az aktuális mérés során elért maximumát láthatjuk.

A mérőprogram a feszültségértékből kiszámítja a csúszka helyzetét. Mérés folyamán az értékek számszerű megjelenítése mellett grafikus szemléltetés is segíti a munkát. Viszonylagos egyszerűsége miatt alkalmas arra, hogy használatával megismerkedjünk a rendszer működésével és a kiaknázzható lehetőségekkel.

Hőmérsékletmérés termisztorral

Speciális célokra különleges, hőmérsékletfüggő ellenállások készülnek. Az NTK (negatív temperatura koeficiensű) termisztorok (3.a ábra) ellenállása a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan csökken a következők szerint:

$$R_T = R_{25} \exp\left(B \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}} \right]\right),$$

ahol R_{25} a 25 °C-os hőmérséklethez tartozó ellenállás, B a termisztorra jellemző érték (táblázatból kikereshető) T pedig abszolút hőmérsékletet jelent ($T_{25} = 278$ K). Így a hőmérséklet a következő formulából számolható:

$$T = \frac{1}{a_0 + a_1 \ln \frac{R}{R_{25}}},$$

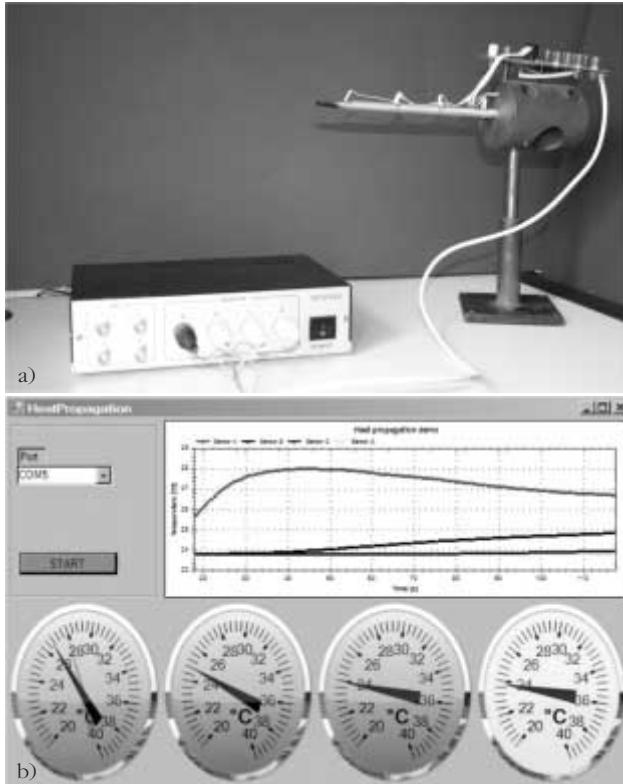
ahol a_0 és a_1 a termisztorra jellemző értékek. A termisztorok nagy érzékenységgűek, a mérendő ellenállás $k\Omega$ nagyságrendű, így könnyű velük mérni a -40 °C és +115 °C közötti tartományban, a kereskedelemben készen és olcsón kaphatók [3].

A virtuális műszer kijelzőjén (a monitoron) a hőmérséklet-idő grafikon látható; mellette megjelenik egy mérőóra, amely a pillanatnyi hőmérsékletérték mellett jelzi az aktuális mérés során elért maximumot (3.b ábra).

Hőterjedés vizsgálata

Egy fémrudat nagy tömegű fémtömbbe (hőtartály) illesztünk. A rúd mentén egyenközűen termisztoros hőmérsékletszenzorokat helyezünk el (4.a ábra). A fémrúd szabad végét melegítsük rövid ideig nyílt lánggal, és mérjük a hőmérsékletet az idő függvényében!

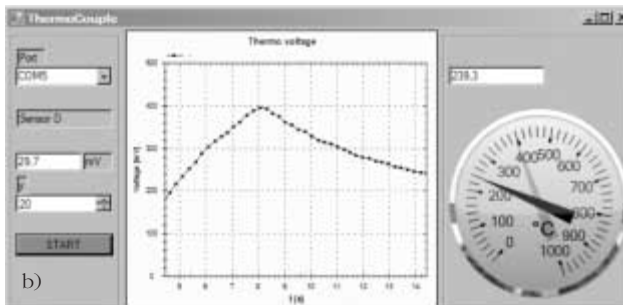
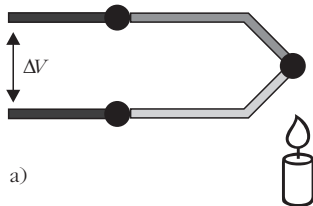
Virtuális műszerünk (4.b ábra) segítségével követhetjük a termikus hullám terjedését. A hőmérsék-



4. ábra. Hőterjedés vizsgálata: fémrúd mentén egyenletes távolságokra elhelyezett termisztorok, valamint az analóg-digitális konverziót végző eszköz (a). A hőterjedés vizsgálata során a mérőórákon az egyes termisztorok pillanatnyi hőmérsékletét láthatjuk, a hőmérséklet-idő grafikonon pedig a termikus hullám terjedése figyelhető meg (b).

let-ideő grafikonon mind a négy termisztor hőmérséklet-változása nyomon követhető; az egyes termisztorokhoz kapcsolt mérőórákon pedig megfigyelhetjük az egyes pontok hőmérsékletének maximumát, mivel ezeket az adott mérés során az órák megőrzik.

5. ábra. Termoelem működésének elvi vázlata (a). A feszültség-idő grafikon a keletkező termofeszültséget ábrázolja, miközben a mérőóra a pillanatnyi hőmérsékletet (és a hőmérséklet maximumát) mutatja (b).



Termoelem működésének bemutatása

A termoelemek két különböző anyagú, egyik végükön összeforrasztott (összehegesztett, esetleg csak erősen összecsavart) drótból állnak. Az érintkezési pont a termoelem úgynevezett „érzékelőpontja”. Ha a szabadon maradt két huzalvéget galvanométerhez vagy digitális feszültségmérő műszerhez csatlakoztatjuk, majd a fémesen érintkező drótvégeket (az érzékelő pontot) megmelegítjük, a műszer feszültséget jelez (5.a ábra). A jelzett termofeszültség hőmérsékletfüggő. A szenzor érzékenysége 10–40 $\mu\text{V/K}$, ugyanakkor széles hőmérsékleti tartományban alkalmazható: a $-100\text{ }^\circ\text{C}$ és $+1000\text{ }^\circ\text{C}$ közötti intervallumon mérhetünk vele.

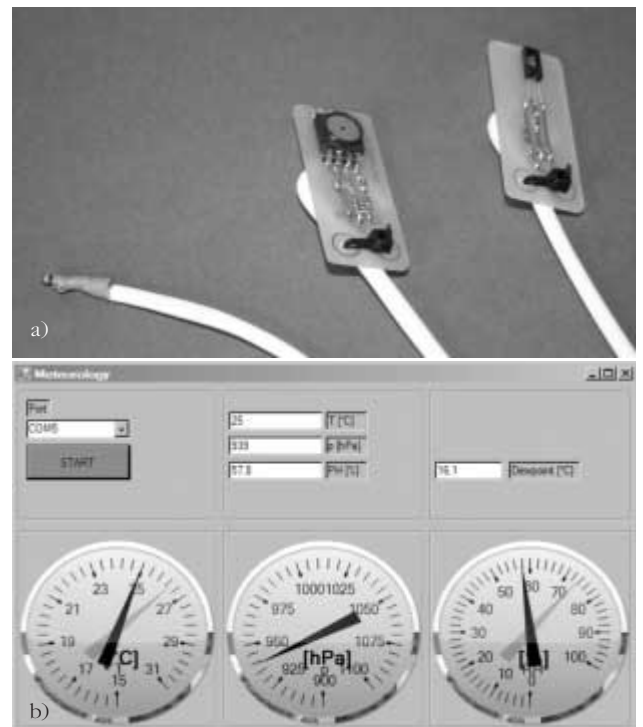
A digitális jelet feldolgozva nyomon követhetjük a feszültség és a hőmérséklet időbeli változását (5.b ábra), előbbit a grafikonon, utóbbit pedig a mérőórák.

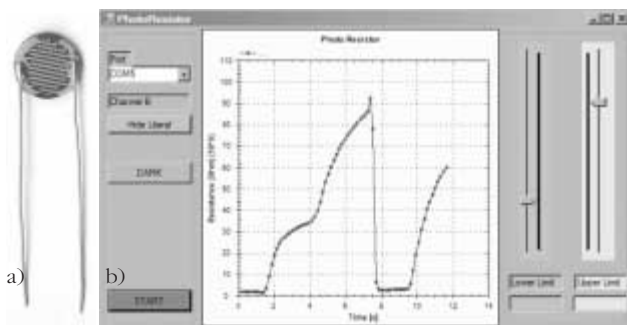
Meteorológiai állomás

Könnyedén készíthetünk olyan eszközt is, ami nem csak a fizikaórákon használható. Földrajztanítás során is bemutatatható az időjárás-állomás, amelyhez termisztor, nyomásérzékelő és páratartalom-érzékelő (6.a ábra) szükséges. Az eszközzel a közvetlen környezetet vizsgáljuk, ezzel fokozott motiváló hatást érhetünk el, csökkenthetjük a gyermekek tudatában meglévő távolságot az iskolai tananyag és a hétköznapi valóság között.

Mérés közben a monitoron folyamatosan megfigyelhető a hőmérséklet, a légnyomás és a páratartalom pillanatnyi értéke (6.b ábra).

6. ábra. Meteorológiai állomás: a felhasznált szenzorok: termisztor, nyomásszenzor és páratartalom-mérő (a). Párhuzamosan mérhetjük a hőmérsékletet, a légköri nyomást és levegő páratartalmát (b).





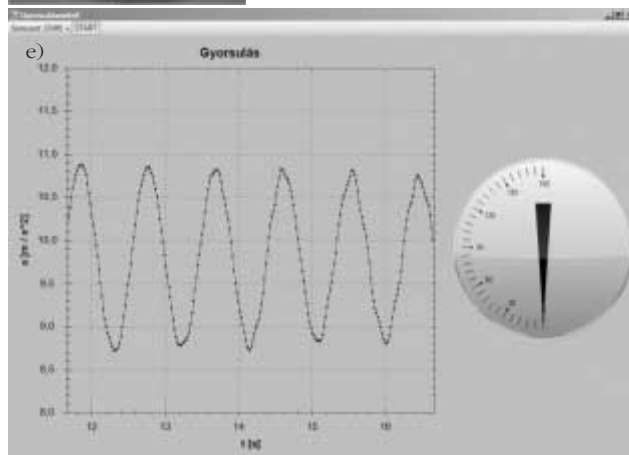
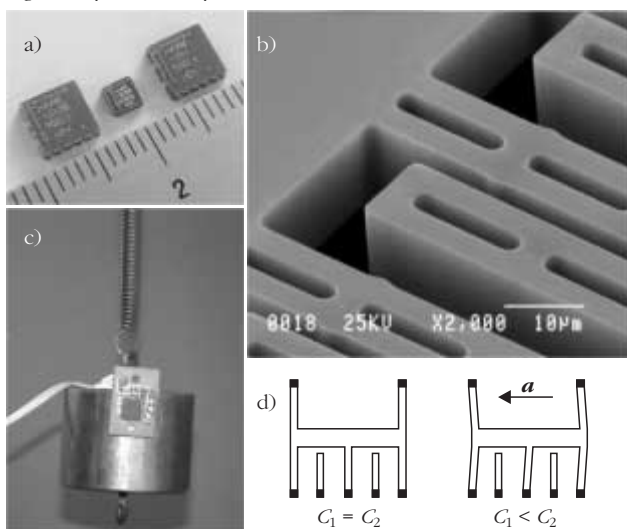
7. ábra. Fotoellenállás (a). Az ellenállás-idő grafikon szemlélteti az ellenállás értékének változását, például ha mérés közben letakarjuk a szenzort (b).

Fotoellenállás vizsgálata

A fotoellenállás olyan félvezetőből készült eszköz, amely alkalmas a fény érzékelésre (7.a ábra). A beeső fény változtatja az ellenállás értékét, a változás elektromos jellé alakítható.

A mérés során ellenállás-idő grafikonk vehetünk fel (7.b ábra), amelyen jól látszanak a változások, például,

8. ábra. Gyorsulásszenzor (a), annak elektronmikroszkópos képe (b), felépítése és működésének elve (d), valamint a rugón rezgő test a ráerősített szenzorral (c). A virtuális műszeren kirajzolódó szinuszgörbe a kitérés-idő grafikon; a mérőórán a gyorsulásszenzor függőleges irányhoz viszonyított kitérése látható, fokokban mérve (e).



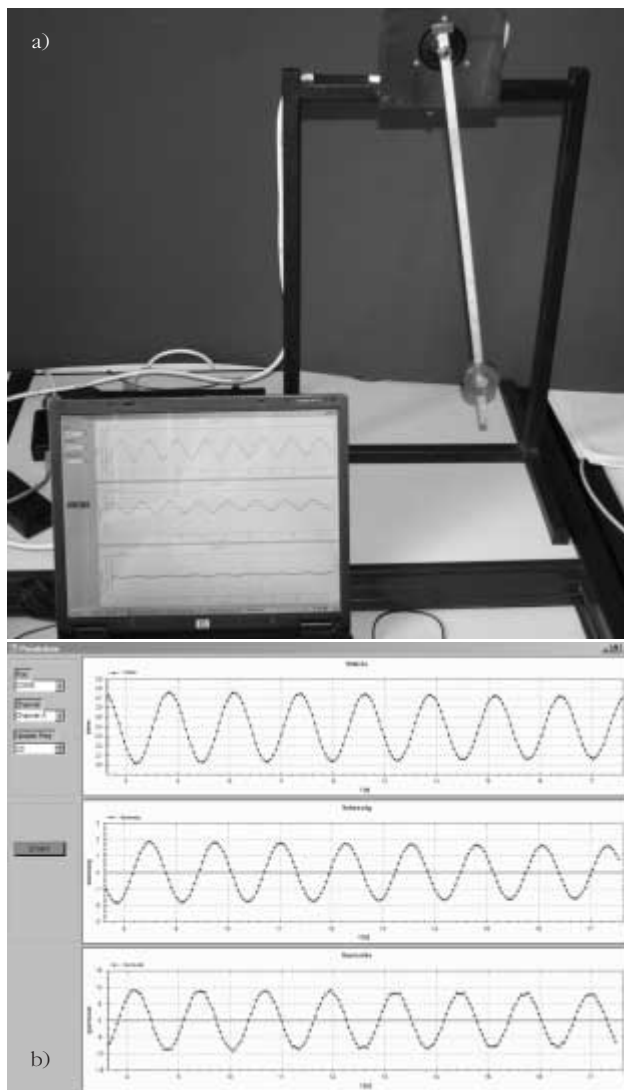
ha mérés közben változik a megvilágító fény intenzitása. Műszerünk lehetőséget ad arra, hogy az ellenállás értékének alsó és felső határt állítsunk be. Ha a megadott intervallumon kívül esik a mért érték, akkor a program ezt egy „világos”/„sötét” gomb megjelenítésével jelzi.

Rugón rezgő test mozgásának kvantitatív vizsgálata gyorsulásmérő segítségével

A gyorsulásmérő (8.a ábra) alapelve egy rugóra erősített, szeizmikus tömeg (8.c ábra) elmozdulásának elektromos jellé alakítása. Kapacitív érzékelés esetén a tömeggel szemben egy síklap található; a tömeg alja és a síklap egy kondenzátor két fegyverzetét alkotják (8.b, d ábra), amelynek kapacitása függ a fegyverzetek távolságától.

Ha a kitérés pontosan függőleges, akkor a kitérés-idő függvény szinuszos; oldalirányú mozgáskomponensek esetén megfigyelhető a csatolás a rezgés és az ingaszerű lengés között. A monitoron a gyorsulás-idő grafikon mellett mérőórán nyomon követhető a rezgő test mozgásának eltérése a függőleges iránytól (8.e ábra).

9. ábra. Inga lengésének tanulmányozása (a), a program rendre kirajzolja a kitérés-idő, sebesség-idő, gyorsulás-idő grafikonokat (b).



Ingamozgás tanulmányozása

Az ingához könnyű mozgású forgó-potenciométert illesztve az elfordulás változó feszültségosztást eredményez (9.a ábra). Ezzel a szögmérést feszültségmérésre vezettük vissza. A számítógép képernyőjén (9.b ábra) a mérési adatok alapján megjelenített kitérés-idő függvényen túl a sebesség-idő és a gyorsulás-idő grafikon is kirajzolható (numerikus deriválás alkalmazásával). A módszer segítségével gyorsan kapunk pontos adatokat, amelyek az ingamozgás tulajdonságainak vizsgálatát megkönnyítik.



Az elkészült kísérleti eszközök alkalmasak arra, hogy tanári mérőkísérletként, csoportos tanulói kísérletként, vagy igényes mérési gyakorlaton használjuk fel az órákon, szakkörökön. Alkalmazásukkal a kevésbé motivált diákok érdeklődését is felkelthetjük a fizika iránt, az egyre csökkenő tanítási időben is valódi kísérletet mutathatunk be szimuláció helyett. A kiemelkedő képességű tanulókat a kísérletek továbbfejlesztésébe is bevonhatjuk.

A virtuális mérés technika alkalmazásával lehetőség nyílik a természettudományos tanári munkaközösség és az informatikát tanító tanárok együttműködésére is. Az érdeklődő diákok maguk is fejleszthetik a kísérleteket, ezáltal összekapcsolhatják a különböző tanórákon megszerzett tudásukat.

A virtuális mérés technikát alkalmazó, kísérletező tanár az alábbi kompetencia-elvárásoknak is megfelel:

– azoknak a kompetenciáknak a fejlesztése a tanulóban/hallgatókban, amelyek a tudás alapú társadalom számára szükségesek. Nyitottá válnak az új ismeretek megszerzésére;

– az új kompetenciák (pl. számítógépes kompetencia) fejlesztésének és a tantárgyi tanuláshoz az összekapcsolása;

– a hatékony tanulási környezet és a tanulási folyamatok támogató légkörének megteremtése;

– az IKT (info-kommunikációs technológiák) integrálása a különböző tanulási helyzetekbe és a szakmai tevékenység egészébe;

– csapatmunkában történő együttműködés a tanuló/hallgatók ugyanazon csoportjaiban dolgozó más tanárokkal/oktatókkal, illetve egyéb szakemberekkel;

– a tanár kezdeményező szerepet vállal saját szakmai fejlődésének irányításában [4].

A Szegedi Tudományegyetemen tanuló fizikatanár-szakos hallgatók a szak módszertani laboratórium során megismerik a virtuális mérés technika alapjait, a mérőeszközöket és a programokat is. A gyakorlatokon tapasztalható érdeklődés arra inspirál bennünket, hogy minél szélesebb körben megismertessük a kifejlesztett méréseket, és további eszközöket tervezzünk. Virtuális mérés technikáról, a kifejlesztett mérőprogramokról, szenzorokról további információ (irodalom, letölthető anyagok) található a következő címen: <http://www.noise.physx.u-szeged.hu/VirtualM/default.htm>

Irodalom

1. Az érettségi vizsga részletes követelményeiről szóló 40/2002. (V.24) OM rendelet (<http://www.okm.gov.hu>)
2. Gingl Zoltán, Kántor Zoltán: *Virtuális mérés technika a kísérletező oktatásban*. II. Országos Neveléstudományi Konferencia 2002. MTA Pedagógiai Bizottsága, 348 oldal
3. Török Miklós: *Elektronika*. JATEPress (2000) 153., 155. o.
4. Nagy Mária: Új kompetenciaelvárások és új képzési gyakorlatok a tanári szakmában. *Új Pedagógiai Szemle* 2004. április–május

VÉLEMÉNYEK

MIT ÉRTSÜNK KÖRNYEZETFIZIKÁN?

Papp Zoltán
DE-ATOMKI, Kihelyezett
Környezetfizikai Tanszék

A „környezetfizika” még viszonylag új fogalom. Az 1990-es évek elején, már oktatóként, az akkori Kosuth Lajos Tudományegyetemen hallottam róla először, az oktatással kapcsolatban, egy tantervi reform apropóján.

A *Fizikai Szemle* szerkesztő bizottsága az 1972-ben meghirdetett VÉLEMÉNYEK sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is. A szerkesztő bizottság állásfoglalása alapján „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatásra és fizika oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, várjuk a magyar fizikusok leveleit.

Az 1990-es évek második felében, amikor a KLTE TTK elindította környezettan tanári, majd környezettudományi szakjait, magam is bekapcsolódtam a környezetfizika oktatásába. A környezetfizika-kurzust 1997-től kezdve immár több mint tíz éve tartom folyamatosan.

A környezetfizika viszonylagos újdonsága ellenére a Debreceni Egyetemen már elég sok tapasztalat felhalmozódott vele kapcsolatban. Szükségét éreztem a megszólalásnak egy *Fizikai Szemlé*ben megjelent cikk (továbbiakban: Cikk) kapcsán, mely a környezetfizika tartalmával, tárgyával foglalkozott [1]. Megítélésem szerint a Cikk által a környezetfizikáról festett kép pontatlanra, hiányosra és egyoldal-

lúra sikeredett, ezért fontosnak tartom azt pontosítani, kiegészíteni. Érzékelem, hogy fizikus és fizikatanár kollégáink körében elég nagy a bizonytalanság a „környezetfizika” mibenlétét illetően, és szeretném, ha ismereteik e tárgyban határozottabbá és teljesebbé válhatnának.

Úgy tapasztalom, hogy a környezetfizikáról még a vele foglalkozókban sem alakult ki egységes kép. A helyzet összefügg azzal is, hogy az önmagában álló „környezet” sem egyszerű fogalom, és hogy a „környezettudomány” értelmezése is eléggé kialakulatlan. Az sem mindegy, hogy a környezetfizikát a kutatás vagy az oktatás oldaláról nézzük. A témában még csak nagyon kevés összefoglaló, áttekintő szándékú munka (könyv) jelent meg, a magyar és az angol nyelvűek is egy kézen megszámlálhatók. E munkák tartalmukban és szemléletükben is számottevően eltérnek egymástól, gyakorlatilag mindegyik a szerző saját véleményének, illetve javaslatának tekinthető arról, hogy mi (legyen) a környezetfizika, vagy hogy mik tartoznak (tartozzanak) a környezetfizikához. Eszerint a Cikkben leírtakat is csak egy szubjektív képnek, illetve javaslatnak kell tekintenünk. Én sem vagyok olyan helyzetben, hogy a környezetfizikáról ezeknél magasabb rendű, objektívebb képet adhaszak. Ennek ellenére remélem, hogy az érdeklődő olvasó környezetfizikáról alkotott képét ezzel reálisabbá, pontosabbá és teljesebbé tehetem.

A környezet, környezettudomány és környezetfizika jelentéséről

Úgy vélem, hogy ha a „környezetfizika”, „környezettudomány” és más „környezet-” előtagú szavak értelmezéséhez akarunk hozzáfogni, akkor nem kerülhetjük el, hogy először a „környezet” jelentését vizsgáljuk. A *Környezetvédelmi lexikon* definíciója szerint a környezet „az élő szervezete(ke)t körülvevő fizikai, kémiai és biológiai körülmények összessége”. Ez az igen tömör meghatározás azonban némi kiegészítést igényel, hiszen nem nyilvánvaló, hogy a „körülvevés” a fizikai térben meddig terjed, vagy hogy a „körülmények” szónak pontosan mi a tartalma. Ezért a lexikon szócikke rögtön ismerteti is a környezet elkülöníthető elemeit, amelyek a „talaj, víz, levegő, élővilág, táj és épített környezet”. Ez már világosabbá teszi, hogy a „környezetbe” csak azok a „körülmények” tartoznak bele, melyek az élőlények közvetlen térbeli közelségében vannak.

De melyek azok a „körülmények”? A természettudományosan hangzó definícióból úgy tűnik, hogy itt leginkább a környezet fent elkülönített elemeit alkotó, azokban jelenlévő anyagi létezőkről, illetve ezek különféle fizikai, kémiai, biológiai tulajdonságairól, állapotváltozóiról van szó. Némi bizonytalanságot okoz, hogy a nem közvetlenül anyagi jellegű tudati, szellemi, társadalmi tényezőket is a (biológiai) „körülmények” közé sorolhatjuk-e. Ez különösen nagy súllyal merül fel az ember esetében. Problémát jelent

még, illetve zavarja a továbbhaladást, hogy a lexikon definíciója szerint két különböző faj, vagy akár két különböző egyed számára is a „környezet” más és más lehet. Hiszen például az egyik faj a talajban, a másik a vízben él. Amikor viszont a környezet védelméről beszélünk, valamilyen egységes környezetre gondolunk. A környezet elemeinek a lexikon általi felsorolása is erre utal. Ha az egész földi élővilág számára egyetlen, egységes „környezet”-et akarunk definiálni, mint a Világegyetem egy jól meghatározott részterületét, akkor abból indulhatunk ki, hogy a földi élővilág hol található. Mai tudásunk szerint legnagyobb sűrűségben a Föld felszíne mentén, de ettől néhány kilométerrel mélyebbre (a szilárd kéregben és a vizekben) és néhány kilométerrel magasabbra (a légkörben) is elhatol. Nagyjából tehát az e térszében található „körülmenyeket” tekinthetjük a „környezet”-hez tartozónak.

A fentiek szerint, gyakorlati szempontból, a Föld felszínét magában foglaló, 10–20 kilométernyi vastagságú gömbhéjat, illetve az ebben jelenlévő anyagi létezők összességét (benne a teljes földi élővilággal és az emberiséggel) tekinthetjük a „környezet”-nek. Ebből kiindulva pedig úgy gondolhatnánk, hogy a „környezettudomány” egyszerűen ennek az anyaghalmozatnak, illetve a benne zajló folyamatoknak a tudományos módszerekkel való vizsgálata, és az így kapott eredmények, megállapítások összessége (nem pedig „a Földre, ..., vonatkozó ismeretek összessége”, ahogyan a Cikk fogalmaz a „környezet” értelmezését elmulasztva). A helyzet azonban ennél sokkal bonyolultabb. A környezetben nagyon sok dolog található, példának okáért az egész emberi társadalom. Ezek szerint az összes, társadalmi létünk különféle aspektusaival foglalkozó, már korábban kifejlődött tudomány is (társadalomtudományok, mérnöki tudományok, agrártudomány, orvostudomány stb.) a környezettudományhoz tartozna? Nyilvánvalóan nem. Manapság mindenesetre a környezettudomány értelmezéséről folyó vita egyik forró témája, hogy a társadalmi vonatkozású tudományok mely elemeit kellene a környezettudományhoz sorolni. Vagy esetleg hagyjuk meg a környezettudományt tisztán természettudománynak? Ez utóbbi álláspont egyre kevésbé látszik tarthatónak. Nem tiszta a helyzet a természettudományok oldaláról sem, hisz’ nemigen sorolhatjuk be a teljes biológiát a környezettudományok közé (habár ez tulajdonképpen megállapodás kérdése), és a nagyobb múltra visszatekintő, a Föld egészével foglalkozó földtudományokkal is vannak hatásköri, illetékességi ütközések. A „környezettudomány” fogalma még messze van a letisztulástól, meghatározása nem egyszerű. Ezen írás tárgya azonban nem a „környezettudomány”, hanem a „környezetfizika”, melynek ügye valamivel könnyebbnek tűnik. Foglalkozzunk tehát a továbbiakban inkább ezzel.

A fentiek alapján logikus lenne azt feltételezni, hogy a „környezetfizika” nem más, mint a „környezet” fizikája. A helyzet azonban itt sem ennyire egyszerű. Például: a környezetfizikához tartozik-e az, hogy a

hűtőszekrény vagy a televízió hogyan működik? Úgy gondolom, hogy nem. Ezek műszaki ismeretek. Viszont a hűtőszekrény- és televízió-használatnak az emberre és a környezetre más elemekre gyakorolt fizikai jellegű hatásai már idetartozhatnak.

Fontos, hogy tisztázzuk a környezetfizika viszonyát a fizikával. Tudjuk, a fizikát a többi természettudománytól leginkább az különbözteti meg, hogy az anyag *legáltalánosabb* jellemzőivel, tulajdonságaival foglalkozik (azokkal, amelyek fennállnak a legtöbb létező anyagfajta, a legszélesebb tér- és időbeli korlátok között). A fizika törvényei – jelenlegi tudásunk szerint – érvényesek a környezet egészére és annak bármely elemére, de ezen túl is, a világuűrben, más bolygókon, csillagokon, a Világegyetem belátható részein. A fizikai törvények érvényessége tehát univerzális, nem korlátozódik a környezetre. A fizika univerzális törvényei, például a klasszikus mechanika Newton-féle törvényei, érvényesek a környezetre is, mégsem soroljuk őket a környezetfizikához. Ezek a törvények a fizikához tartoznak. Az azonban, hogy a fizikai törvények a környezetben hol, mely környezeti elemekben és folyamatokban, hogyan, milyen sajátos módokon és formákban érvényesülnek, és ott milyen speciális következményekre vezetnek, már a környezet fizikájához tartozik. Hogyan befolyásolják, irányítják a Newton-törvények a levegőt, a vizek, a talaj, vagy az élőlények mozgásait, illetve egyensúlyát? Igen, ez már lehetne környezetfizika!

Itt azonban megjelennek hatásköri, illetékességi ütközések más, korábban létrejött tudományágakkal, mint a meteorológia és légkörfizika, vízföldrajz és hidrológia, földtan és geofizika, élettan és ökológia stb. Hiszen az általuk vizsgált jelenségek magyarázatához ezek a tudományágak is használják a fizikai ismereteket. Hogyan, mi alapján dönthetjük el akkor, hogy egy konkrét jelenség a fenti tudományágak egyikéhez, vagy a környezetfizikához tartozik? Hogyan helyezhetjük el ezt a csak nemrég kitalált „környezetfizikát” az előbbi, nagyobb múltú tudományágakhoz képest?

A környezetfizika a kutatás oldaláról

Úgy tűnik, a környezetfizika létrejöttéhez az vezetett, hogy egyesek elkezdtek foglalkozni (főként a kutatás oldaláról) olyan, a környezet fizikáját érintő témákkal, amelyekre korábban más tudományágak nem tartottak igényt, illetve amelyekkel más tudományágak legfeljebb csak nagyon periférikusan, kis intenzitással foglalkoztak. E témákat nehéz lett volna máshová besorolni, ezért hozták létre kategorizálásuk céljára a „környezetfizika” fogalmát. A környezetfizika, mint kutatás, tehát azokba a résekbe telepedett, azokat a réseket próbálja kitölteni, amelyeket a korábban létrejött tudományágak a környezet fizikájának területén üresen, illetve parlagon hagytak. A környezetfizikai kutatás ma is leginkább ezekben a résekben folyik. Továbbfejlesztésére, terjeszkedésére lehetőség ad az,

hogy egyrészt még nincs minden rés kitöltve, másrészt nem teljesen reménytelen a behatolás a többi tudományág felségterületeire sem. Jelenleg azonban a helyzet az, hogy a környezet fizikájának talán legfontosabb területeit, a légkör, a környezeti vizek és a talaj-földkéreg fizikáját nem a környezetfizikához (és nem is a környezettudományhoz) hanem a kialakult szokásjog alapján a megfelelő földtudományi diszciplínákhoz soroljuk.

A kutatás felől nézve tehát a környezetfizika, réskitöltő jellege miatt, témák összefüggéstelen, laza, széteső halmazának tűnik. Ezt elég jól tükrözik a Cikkben leírtak. Ott a szerző a környezetfizikát a kutatás oldaláról szemléli, és (implicit módon) úgy definiálja, mint a környezettudomány azon „jelentős területeit, ... amelyeknél a fizikai ismeretek döntő szerepet játszanak”. Ha a környezettudományra nem a szerző túlságosan (az egész Földre) kitágított meghatározását használjuk, hanem az általam fentebb leírtakból indulunk ki, akkor ez a környezetfizika-definíció elég jó összhangba kerül az enyémmel. Eszerint, noha a meteorológia-légkörfizika nagyon jelentős (talán a legjelentősebb) területe lehetne a környezetfizikának, mégsem ahhoz tartozik.

A Cikk szerzője felsorolja a környezetfizika általa legfontosabbnak vélt területeit, de ezekkel kapcsolatban nem indokolja igazán meggyőzően, hogy saját definíciója alapján miért kellene ezeknek ide tartozniuk, illetve, hogy miért éppen ezek tartoznak ide és nem mások. Több felsorolt terület kapcsán is felvetődnek problémák: egyáltalán a környezettudományhoz tartoznak-e, mennyire jelentősek, és valóban döntő szerepet játszik-e bennük a fizika? Más szerzők által javasolt egyéb területek viszont nem kerülnek említésre. Nem derül ki igazán, hogy a szerző szerint mi a „jelentős”. Az, amivel már sokan foglalkoznak, vagy az, ami sok dolog megértésében segíthet, vagy az, ami az ember életét erősen érinti, vagy valami más?

A környezeti (anyag)áramlások területe bizonyosan jelentős, és a fizika is nagy szerepet kap benne, de vajon a környezettudományhoz, és így a környezetfizikához sorolható-e egyáltalán, tekintve, hogy a földtudományok már elég régóta és intenzíven foglalkoznak vele. Talán csak a szennyezőanyagok transzportja az, amit ebből tényleg a környezetfizikára hagytak. Emellett szerintem az anyagáramlásoknál jogosabban lehetne a környezetfizikához sorolni az energia környezeti vándorlását, amit a földtudományok eddig eléggé elhanyagoltak.

A zaj és a zajvédelem jelentős terület olyan értelemben, hogy az ember életét erősen és közelről érinti, de a Cikk szerzőjének érvelése nem igazán meggyőző a tekintetben, hogy itt a fizikának döntő lenne a szerepe. A felmerülő feladatok inkább mérnöki, műszaki jellegűnek tűnnek. Vannak más, az ember életét erősen érintő, sőt, veszélyeztető környezeti fizikai behatások is például a mechanika vagy a hőtan oldaláról (nagy gyorsulások, feszültségek és nyomások közlekedési balesetekben, vagy el-

és leesésekben; hőmérsékleti szélsőségek, lehűlés-túlmelegedés), amelyek érzésem szerint inkább vetnek fel fizikusi feladatokat, és még a jelentőségük is nagyobb a zajnál az általuk okozott halálesetek számát tekintve. E feladatokat talán indokoltabb lenne a környezetfizikához sorolni, mint a zajhoz kapcsolódókat.

A szerző által felsoroltak közül a különféle sugárzások környezeti jelenlétének és hatásainak vizsgálata az a terület, amelytől a legkevésbé lehet elvitatni, hogy (legalábbis részben) a környezettudományhoz és a környezetfizikához sorolható. Megjegyzendő azonban, hogy a sugárzások az emberre és az élővilágra gyakorolt élettani hatásaik miatt érdekelnek bennünket, és ezen a területen az orvosok, biológusok szerepe nem kisebb a fizikusokénál. A sugárzások a környezet fő energiaszállítói, ezért könnyen a földtudományok művelőivel kerülhetünk háztásköri vitába.

A Cikk szerzője az energetikáról ír a legnagyobb terjedelemben. Érvelése azonban nem meggyőző. A fizikusok régebben komoly érdemeket szereztek az energetika területén, mára azonban az „energiatermelés” főleg műszaki, mérnöki, gazdasági, társadalmi, politikai ügyé vált, ahol szerintem a fizikusoknak egyre kevesebb a keresnivalójuk. A már meglévő energiaátalakítási módszerek továbbfejlesztése, javítása, esetleg újak kifejlesztése még sok munkát adhat a fizikusoknak is, de nem igazán látom indokoltnak ezt a tevékenységet a környezetfizikához sorolni. (Meg kell azonban jegyezni, hogy e véleményemmel kisebbségben vagyok. A környezetfizikával foglalkozó könyvek többsége ugyanis tárgyalja ezt a témakört.) Szerintem, ha már az iparnál tartunk, jogosabban lehetne a környezetfizikához sorolni a közlekedés és a házépítés (házban tartózkodás) fizikai jellegű hatásait vizsgáló kutatásokat. E tevékenységek ugyanis nagy, közvetlen és sokrétű hatást gyakorolnak az emberre és a környezetre.

Más szerzők írásaikban több kutatási területet említenek, amelyek szerintük a környezetfizikához sorolhatók, a Cikk viszont nem tesz rólok említést. Ilyenek például: 1) a légköri aeroszolkok forrásainak, nyelődinek, terjedésének, tulajdonságainak és környezeti hatásainak vizsgálata; 2) az energia transzportja az élőlények teste és annak környezete között; 3) hasznos növények mikro-meteorológiája; 4) környezeti folyamatok nyomon követése és rekonstruálása radioaktív izotópok, mint nyomjelzők segítségével; 5) mesterséges radioaktív szennyezések eredetének és környezeti migrációjának vizsgálata; 6) környezeti folyamatok nyomon követése és rekonstruálása stabil izotópok arányainak mérése alapján; 7) az építkezéssel mesterségesen megváltoztatott környezeti viszonyok (házban, városban tartózkodás) hatásai; 8) energiatakarékos házak építésének alapelvei; 9) a bioszféra homeosztázis-modelljének vizsgálata a fizika oldaláról; 10) a legkülönbélebb, fizikai elveken alapuló mérőeszközök és mérési módszerek alkalmazása környezeti analitikai feladatok megoldására.

A környezetfizika az (egyetemi) oktatás oldaláról

Napjainkban a környezeti kérdések mind fontosabbak. Ebben a helyzetben természetes módon vetődik fel az igény, hogy fizikus és fizikatanár szakos hallgatók képzésük során halljanak a környezet fizikájáról is. Ugyanakkor a környezettudományi, környezettan, környezetmérnök szakos hallgatókban fontos tudatosítani, hogy a környezeti folyamatok megértése, a környezeti problémák megoldása fizikai ismeretek nélkül nem lehetséges. Ezért e hallgatók tanterveibe is be kell kerülnie a környezet fizikájának. A tantárgy neve – főleg a rövidség igénye miatt – általában „Környezetfizika”. Felvetődik a kérdés, hogy e „Környezetfizika” nevű tantárgyak keretében mit oktassunk? Korlátozódjunk azokra a fentebb áttekintett területekre, melyeket a kutatás szempontjából a (szűken értelmezett) környezetfizikához szokás sorolni, vagy inkább törekedjünk arra, hogy témánkat ennél tágabb kontextusba helyezve, a hallgatóknak szélesebb megalapozást, teljesebb kitekintést nyújtsunk, vagyis, hogy (tágabb értelemben) a környezet fizikáját oktassuk? En az utóbbi megoldás mellett vagyok, és ezt az alábbiakban megpróbálom röviden indokolni.

A fizikus, fizikatanár szakos hallgatók az egyetemen általában nem hallgatnak más olyan környezeti irányultságú tárgyakat, amelyek érintenék a környezet fizikáját. Ezért, ha a „Környezetfizika” tárgy keretében csak a kutatási szempontból idesorolt néhány területről hallanak, olyan helyzetbe kerülhetnek, hogy nem látják a fától az erdőt, illetve az erdő helyett csak néhány fát látnak. Szerintem jobb megoldás, ha a tematikát a környezet fizikáján belül maradván kiszélesítjük, nem félve attól, hogy a földtudományok és az élettudományok területeire kalandozzunk.

A környezettudományi, környezettan, környezetmérnök szakos hallgatóira sajnos jellemző, hogy fizikából igen keveset tudnak. Már csak ezért sincs sok értelme annak, hogy speciális környezetfizikai kutatási területeket mélységükben (számos fizikai egyenlettel kísérve, bonyolult részletekbe menve) mutassunk meg nekik. Itt a képzés szerkezete is azt igényli, hogy inkább széleskörű, mint mély áttekintést adjunk arról, hol és hogyan, milyen eredménnyel jelenik meg a fizika a környezetben. E szakokon a hallgatók több olyan, alapozó jellegű, környezeti vonatkozású tárgyat is hallgatnak, amelyek érinthetik a környezet fizikáját (légkörtan, földtan, hidrológia, élettan, ökológia). Ezek a tárgyak azonban nagyrészt leíró jellegű ismereteket közvetítenek, és a tapasztalat azt mutatja, hogy bennük – részben az időhiány miatt – háttérbe szorulnak a fizika törvényein alapuló magyarázatok. Ezért a „Környezetfizika” tárgy tematikájának a környezet fizikáján belül maradó, a fizikai magyarázatokra koncentrálni kiterjesztése a földtudományok vagy az élettudományok irányába itt sem okoz számottevő tematikai átfedést, és ugyanakkor biztosítja a széles körű áttekintés lehetőségét.

A fentiekből kiindulva én tehát amellet vagyok, hogy az oktatás keretében a környezetfizikát értelmezzük inkább a környezet fizikájaként, még akkor is, ha így a földtudományok és az élettudományok felségterületeire is behatolunk. Saját előadásaim tematikáját ebből kiindulva állítottam össze. Az új, két-szintű képzés rendszerében a környezettan alapképzés, valamint a fizika alap- és mesterképzés keretében is a „Környezetfizika” két féléves, heti 2 órás tárgy, és tematikája a környezettan és a fizika szakokon megegyezik. Az első félév anyaga fogalomgyarazatokkal kezdődik, majd a környezeti anyag eredetének, fejlődésének rövid áttekintésével folytatódik. Ezután több előadás keretében a külső (a kozmikus térből, a Föld bolygó voltából, valamint a Föld belsejéből származó) hatások és környezeti követ-

kezményeik kerülnek sorra. A félév további részében a földkéreg, a vizek és a légkör fizikájával kapcsolatos legalapvetőbb ismereteket tekintem át. A második félév a környezeti radioaktivitás és ionizáló sugárzások tárgyalásával kezdődik, majd több előadás keretében az élővilág fizikájának alapszintű áttekintésével folytatódik. Ezt követi az emberi tevékenységek környezeti hatásainak tárgyalása (benne a mesterséges, épített környezettel, a zajjal és az energetikával), és végül a környezet vizsgálatára alkalmazott, fizikai elveken működő eszközök és módszerek ismertetése.

Irodalom

1. Kiss Á.: Fizika a környezettudományban. *Fizikai Szemle* 57/7 (2007) 232–236.

KÖNYVESPOLC

Szentgyörgyi Zsuzsa (szerk.): MÉRNÖK – TUDÓS – ISKOLATEREMTŐ MICHELBERGER PÁL ÉS KORA

Typotex, Budapest, 2008, 392 oldal

A Typotex *Életutak* sorozatának második köteteként jelent meg a mérnök-tudós *Michelberger Pál* interjúköte *Szentgyörgyi Zsuzsa* szerkesztésében, amelynek elkészültére Michelberger professzor 75. születésnapja adott alkalmat. Mielőtt azonban az interjúra kerülne sor, egy összefoglaló résszel kezdődik a könyv (terjedelmének egyharmadában-egynegyedében), amely mindenekelőtt a magyar gazdaságfejlődés igen rövid, mégis kitűnő összefoglalását adja 1867-től napjainkig. Különös hangsúlyt kap itt a magyar autóbushyártás, amely legeredményesebb időszakában 14–15 ezer autóbust (ez az akkori nyugat európai autóbushyártás mintegy fele) termelt évente, és ebben nem kis érdeme volt Michelberger Pálnak. Ugyanebben a részben találjuk Michelberger professzor életrajzának összefoglalását is, aki művelt, zeneszerető Pest környéki sváb munkáscsaládból származik (üvegcsiszolók, hangszerkészítők leszármazottja).

Az interjúrészt, amely tulajdonképpen „lelke” a könyvnek, három munkatársa, tanítványa (*Magyar István, Péter Tamás, Várlaki Péter*) vette fel, mint kérdező. Ezek során – többféle metszetben, bizonyos átfedésekkel – egy gazdag életút képe bontakozik ki, amely nemcsak érdekes, mint olvasmány, de a korszakra, és ezen belül az iparfejlődésre (különösen a magyar autóbushyártásra) vonatkozóan rendkívül gazdag információkban. Ahogy Szentgyörgyi Zsuzsa írja a könyv előszavában „Michelberger Pál gazdag

életútja mögött a 20. századi Magyarország zaklatott gazdasági és társadalmi háttere húzódik meg”.

Az életpálya Vecsésről indult, és a helyi plébánosnak nagy szerepe volt abban, hogy a tehetséges gyerek gimnáziumban tanult tovább, hogy életútja a Műszaki Egyetem rektorságáig, a Magyar Tudományos Akadémia alelnökségéig és a FISITA (Federation Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile) elnökségéig vezetett, közben és párhuzamosan döntő szereppel a magyar autóbushyártásban az Ikarus gyárnál.

Az interjú kérdései és feleletei fejezetekbe csoportosulnak: például *A pálya kezdetei, A rektorság éve, A tudományos pálya, Magánélet – család, Kedvtelések – zene, Pillantás a jövőbe* stb. A könyvet részletes életrajzi adatok, publikációs jegyzék zárják.

Az ismertetést azzal az „útravalóval” érdemes befejezni, amit Michelberger professzor a könyv vége felé a közlekedés, a közlekedéstudomány fejlődésével, jövőjével kapcsolatban megállapít: „...az adott tudomány területéről ki kell lépni a társadalomtudomány területére is. És a társadalomtudomány területéről ki kell lépünk az – egyébként nem tudománynak tekinthető – etikai kérések körébe is. És végső soron, a döntéseink zömében etikai alapon kell meghozni a döntést...” Mindez minden bizonnyal túlmutat a közlekedéstudomány és közlekedési ipar területén.

Berényi Dénes

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2008. évi Küldöttközgyűlése

Az Eötvös Társulat éves Küldöttközgyűlését 2008. május 31-én tartotta az ELTE Fizikus tömbjében.

A hagyományoknak megfelelően napirend előtti előadással kezdődött a program. *Cserti József*, ELTE Komplex Rendszerek Fizikája tanszék docense *A jövő elektronikája: a spintronika* című előadása a 2007. évi Nobel-díjjal jutalmazott kutatás témájához kapcsolódott, kezdve a spintronika alapfogalmaival, befejezésül bemutatva a téma nemzetközi és hazai kutatásának helyzetét.

Az előadást követően, miután a megjelentek létszáma elérte a határozatképességhez szükséges számot (85 küldöttből 65 fő), a Társulat elnöke megnyitotta a Küldöttközgyűlést.

Sólyom Jenő köszöntötte a küldötteket, a meghívottakat, az elnökséget, valamint a Társulat érdeklődő tagjait, majd beszámolt a 2007. évben végzett tevékenységekről. Részletesebben beszélt az alábbi kiemelt témákról: nemzetközi kapcsolatok (EPS, CERN); MTA-, valamint a médiakapcsolatok; az OKM kerettantervével kapcsolatos társulati állásfoglalás; fizika, illetve természettudományi tantárgyak oktatása körül kialakult helyzet elemzése; a szakcsoportok tevékenysége; a Science Centre Alapítvány; *Tisza László* centenáriumi ünnepség, Teller Ede emléktábla-avatás, *Montváry István* tiszteleti tag székfoglaló előadása, Marx György-emlékülés (2008. május, MTA) és a Csillagászat éve (2009).

A második napirendi pontnak megfelelően a szavazatszámoló bizottságot, a jegyzőkönyv vezetőjét és hitelesítőit a Közgyűlés egyhangúlag megszavazta.

Ezt követően tartotta meg *Kádár György* főtitkári beszámolóját. Előzetesen az elnöki beszámolót kiegészítette a tanári szakcsoportok munkájának értékelésével. Kiemelte a két tanári ankétot, mindkét rendezvényt igen sikeresnek ítélte meg. Ezt követően a Társulat 2007. évi gazdálkodását, pénzügyi beszámolóját, valamint a 2008. évi költségvetési tervet terjesztette a Közgyűlés elé.

A Társulat elnöksége, amelynek jogköre az ügyrend módosítása, a területi csoportok gazdálkodását érintve az alábbi határozati javaslatot fogalmazta meg, és erről tájékoztatta a Közgyűlést. Ügyrend 4.4.5. „A területi szervezetek gazdálkodása során százezer forintot meghaladó egyedi értékű tárgyi eszköz beszerzésére csak a Társulat főtitkáriának előzetes hozzájárulásával kerülhet sor. A területi szervezet által beszerzett tárgyi eszközöket – a területi szervezet használati jogának feltüntetésével – a Társulat központi leltári nyilvántartásában kell szerepeltetni.”

A felügyelő bizottság értékelését, *Ádám Péter* felügyelő bizottsági elnök egyéb elfoglaltsága miatt, *Härtlein Károly* bizottsági tag ismertette. A Felügyelő Bizottság a Társulat 2007. évi gazdálkodását áttekintette, azt rendben lévőnek találta, ezért javasolta a 2007. évi pénzügyi beszámoló, valamint a 2008. évi költségvetés elfogadását.

Ötödik napirendi pontként a Társulat alapszabályának módosításáról szóló javaslatok következtek. *Kádár György* főtitkár tájékoztatta a Közgyűlést: a Sugárvédelmi Szakcsoport vezetősége azzal a kéréssel fordult az elnökséghez, hogy a szakcsoportok elnöki és titkári tisztségére – a jelenlegi alapszabálytól eltérően – a 4 évre történő megválasztás egyszer megismételhető legyen, ugyanis a fenti tisztséget betöltők jelenleg folyamatosan nem választhatók újra. A felügyelő bizottság korábbi elnöke, *Wojnarovich Ferenc* jelezte, hogy a Társulat elnökére vonatkozó tisztújítás a 2005. évi alapszabály szerint mára ellentmondásos, ezért ezt a részt is módosítani szükséges. *Kádár György* javasolta, hogy a Társulat közhasznú tevékenysége egészüljön ki a környezetvédelmi tevékenységgel. *Sükösd Csaba* alelnök javasolta, hogy a *Fizikai Szemle* támogatói között szerepeljen a Magyar Nukleáris Társaság is.

A javaslatokat követő vita és szavazás eredményeként az alábbi határozatok születtek:

– A Társulat elnökének megbízatása 2 évre szól, s egyszer újraválasztható.

– A *Fizikai Szemle* támogatói között szerepel a Magyar Nukleáris Társaság.

Sólyom Jenő elnök beszámolóját tartja.



Fotó: Kármán Tamás



Fotó: Kármán Tamás

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem kitüntette Gergely György

– Az Alapszabály kiegészül a környezetvédelmi tevékenységgel.

A fenti három javaslatot a Közgyűlés egyhangúlag elfogadta.

A Szakcsoportok vezető tisztségviselőinek – elnök és titkár – újráválasztásáról vita alakult ki. *Solymosi József*, a Sugárvédelmi Szakcsoport elnöke kifogásolta, hogy egy demokratikus szervezet esetében a Társulat vezetősége nem ad szabad kezét a szakcsoportoknak, hatalmat kíván gyakorolni felettük. Módosítási javaslata: „A szakcsoport elnöke és titkára ugyanarra funkcióra egyszer a közvetlenül következő négy éves ciklusra is megválasztható.” *Patkós András* alelnök, *Sükösd Csaba* alelnök, *Kádár György* főtitkár, valamint *Martinás Katalin*, *Lévai Péter* és *Bakonyi Imre* küldöttek is bekapcsolódtak a vitába, többen felvetették az újráválasztási jogi lehetőségének vizsgálatát.

A választás, illetve újráválasztás tárgyában a vitapartnerek között nem sikerült közös állásfoglalást kialakítani, ezért a főtitkár szavazást kért e témában.

A szavazás eredményeként *Solymosi József* módosítási javaslata 7, az elnökség módosítási javaslata 28 szavazatot kapott. Mivel a küldöttek kevesebb, mint 50 százaléka szavazott az alapszabály módosítására, ezért az alapszabály vonatkozó pontja módosítás nélkül érvényben marad: a szakcsoportok tisztújításánál az elnök és titkár 4 éves időtartamra választható meg.

Hetedik napirendi pontként új tisztségviselők megválasztására került sor. *Sólyom Jenő* elnök – az elnökség nevében – javaslatot tett *Dörnyei Józsefné Németh Judit* volt elnök tiszteletbeli elnökké történő megválasztására. Kérte továbbá, hogy *Szatmáry Zoltánt*, aki 2008 januárjától megbízottként ellátja a *Fizikai Szemle* főszerkesztői tevékenységét, a Közgyűlés válassza meg a folyóirat főszerkesztőjévé.

Gyulai József, a jelölőbizottság elnöke a Közgyűlés elé terjesztette a tisztújításra vonatkozó javaslatot:

– A Társulat 2009. évi Közgyűlést követően hivatalba lépő új elnöke pozícióra – 2008-as Közgyűléstől a 2009-es Közgyűlésig alelnök – *Horváth Zalánt* javasolja.

– A jelölőbizottság elnökének mandátuma lejárt, ezért új elnöknek *Patkós András*t javasolja.

– A jelölőbizottság tagjai közül *Papp György* és *Vertse Tamás* mandátuma lejárt, *Kiss Gyula* és *Zsúdel László* mandátuma 2 évre meghosszabbítható. Tehát tagságra javasolta *Kiss Gyulát*, *Zsúdel Lászlót*, *Heszler Pétert* és *Krasznaborkay Attilát*.

A Társulat díjbizottsága és elnöksége javasolta, hogy az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem kitüntetését *Gergely György*nek ítélje oda a Közgyűlés.

A Küldöttközgyűlés a hetedik napirend szerinti javaslatokat egyhangúlag megszavazta. A Társulat érdemét *Sólyom Jenő* elnök adta át *Gergely György*nek.

Ezután került sor a tudományos és társulati díjak kiosztására. *Faigel Gyula*, a díjbizottság elnöke ismertette a díjbizottság döntését és felkérte *Sólyom Jenő* elnököt a díjak átadására.

A *Marx György* Felsőoktatási díjat *Dávid Gyula*, a *Schmid Rezső*-díjat *Gubicza Jenő*, a *Jánossy Lajos*-díjat *Kun Ferenc*, a *Bródy Imre*-díjat *Rajta Ferenc*, a *Novobátzky Károly*-díjat *Takács Gábor*, a *Szalay Sándor*-díjat *Tőkési Károly*, az Eötvös Plakettet *Molnár László* és végül a *Prometheusz*-éremet *Végh László* vehette át.

Sólyom Jenő, a Társulat elnöke zárszavában gratulált a kitüntetetteknek, megköszönte *Kármán Tamás*, a *Fizikai Szemle* műszaki szerkesztője, valamint *Nagy Zsigmondné*, *Margó* ügyvezető titkár munkáját, és tevékenységük elismeréséül a Társulat Eötvös-plakettjét adta át nekik.

Ezt követően megköszönte a részvételt és további jó munkát, a nyári szünetre pedig jó pihenést kívánt a résztvevőknek.

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Nano Törzsasztal

A Magyar Tudományos Akadémia Akadémiai Klub keretében 2004 óta működik a Nano Törzsasztal. A szakmai témákon kívül az utóbbi összejöveteleken napirenden volt a nanotechnológia és nanotudomány oktatása. Alakult egy *ad hoc* bizottság, ezt *Gyulai József* vezeti.

Mint civil szervezet, a Nano Törzsasztal figyelmét elsősorban a nanoval kapcsolatos ismeretek középszintű oktatására fókuszálja.

A 2008. júniusi összejövetelen kialakult vélemény szerint egy lehetséges, alulról építkező önkéntes mozgalom indulhat el. Ennek keretében a Törzsasztal részt-

vevői előadásokat tartanának azokban a középiskolákban, ahol erre igény van. Az előadások a diákoknak szóló, egy-két alkalmat felölelő, szakkör jellegű elfoglaltságot jelentenének, amelyeken természetesen szívesen látjuk az érdeklődő tanárokat is. Későbbiekben elindulhatna a tanárok továbbképzése. Erre valós, vagy virtuális szervezeti egységeket kell létrehozni.

Vizsgálendő továbbá önálló tanárszak indítása, szigorúan figyelembe véve az érvényes akkreditációs feltételeket.

Vizsgáltuk egy nanobusz létrehozását, ahol első sorban a német modell volt a kiinduló pont ([http://](http://www.nanotruck.de)

www.nanotruck.de). Nagy szerepet szánunk a különböző nano tematikájú honlapoknak. Tervezzük egy magyar nyelvű nano honlap létrehozását a Nano Törzsasztal honlapján belül, összegyűjtve a magyar nyelvű linkeket.

Az elsajátított ismeretek hozzájárulhatnak a természettudományos ismeretek szintetizálásához, illeszkedve *Pálinkás József* MTA elnök javaslatai megvalósulásához.

A részletek iránt érdeklődők kérdéseit várjuk.

Mojzes Imre

a Nano Törzsasztal elnöke
mojzes@ett.bme.hu

HÍREK ITTHONRÓL

Az ELTE Fizikai Doktori Iskolájának hirdeteménye

Az ELTE Fizikai Doktori Iskolájának *Fizika tanítása* programja (részletesebben lásd *Fizikai Szemle* 47 (2007) 333–340. old.) a 2008–2009. tanévre 11 új hallgatót vett fel, köztük két erdélyi tanár kollégát.

A megkezdett PhD-munkák (a témavezetők nevével):

Az anyagtudomány oktatása középiskolai, illetve BSc szinten (*Lendvai János*)

Komplex tananyag készítése és alkalmazási lehetőségei a középiskolai modern fizika tanításában (*Jubász András*)

A hálózatépítés szociológiai, pszichológiai és didaktikai alkalmazásai az iskolában (*Néda Zoltán, Derényi Imre*)

Számítógépek használata a középiskolai mechanika oktatásban (*Tasnádi Tamás*)

Fizikai jelenségek modelljei különböző szintű leírásban (*Rácz Zoltán*)

Nemlineáris jelenségek vizsgálata és elemzése középiskolai diákkörön, szakkörön (*Tél Tamás*)

Humán érdeklődésű középiskolai tanulók integrált szemléletű természettudományos oktatásának lehetőségei (*Ily Judit*)

A számítógép felhasználása a fizika BSc szintű oktatásában (*Tasnádi Péter*)

A természetes radioaktivitás Heves megyében (*Horváth Ákos*)

Demonstrációs kísérletek, mérések kidolgozása, kiemelt figyelemmel a feladat- és problémamegoldás segítésére (*Jubász András*)

Levegőben levő nyomelemek kimutatása, forrásai és környezeti hatásai vizsgálata (*Horváth Ákos*)

A doktori képzés előadásai nyilvánosak, minden érdeklődő tanárkollégát szívesen látunk! Az előadások időpontja: minden hónap második szombatja, délelőtt 9 órától körülbelül 4 óráig.

A 2008–2009-es tanév első félévének előadási témái:

A fizika tanítása. Részecekefizika. Fizika a biológiában. A fizika szemléletformáló nagy kísérletei.

Az első előadás 2008. szeptember 13., szombaton délelőtt 9 órakor kezdődik az ELTE TTK Északi Tömb (Pázmány Péter sétány 1/A), 4.52 (Sas Elemér) termében.

Kürti Jenő

igazgató

ELTE Fizikai Intézet

Ki lesz a befutó?

Debrecenben és Bilbaóban megosztva tartotta alakuló ülését az Európai Neutronkutató Központ (ESS) fizikusokból álló nemzetközi szakmai tanácsadó testülete 2008. július 22-től 24-ig. A tanácskozás célja egy közös tudományos koncepció kidolgozása volt az ESS kutatási nagyberendezés megszerzésére irányuló ajánlati dokumentáció részeként.

Az Európai Neutronkutató Központ megvalósításának jogáért a svédországi Lund, a spanyol Bilbao és a magyarországi Debrecen versenyez. A három pályázó közül a magyar és a spanyol fél 2007 októberében együttműködési megállapodást kötött. Az együttműködés kezde-

ményezésére, a világ vezető szakembereit felkérve, létrejött az a szakmai grémium, amely az ESS hivatalos, tudományos tanácsadó testülete lett. Az International Advisory Board (IAB) független szakmai testület, amelynek magyar társelnöke *Pálinkás József*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke, másik társelnöke pedig *Ian Anderson*, az ESS-hez hasonló amerikai neutronforrás igazgatója. A testület tagjai között ott van *Masatoshi Arai*, a japán neutronkutató vezetője, illetve *Andrew Taylor*, az ISIS Forrásközpont igazgatója is.

További részletek a Nemzeti Fejlesztési és Gazdasági Minisztérium honlapján olvashatók.

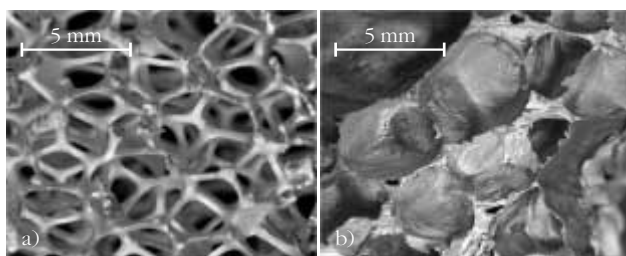
NAPJAINK KORSZERŰ ANYAGAI: A FÉM HABOK

Környezetünkben számos olyan anyag található, amelynek szerkezete apró, üreges egységekből, cellákból áll, ezeket összefoglalóan celluláris anyagoknak hívjuk. Ilyenek a különböző habok (szappanhab, sörháb, borotvahab), a mosogatószivacs, de ilyen tulajdonságú a hungarocell és a bukósisakok belsejét alkotó műanyag is. Az élelmiszerek között is előfordulnak celluláris anyagok, például a kenyér, a piskóta és a jégkrém.

A természetben is találhatunk celluláris anyagokat. A legismertebbek a fa és a szivacs, de emellett a korall, az emberi koponya és a combcsont is celluláris szerkezetű. Az emberiség már több ezer éve használ természetes celluláris anyagokat, de csak a 20. században kezdett el mesterséges celluláris anyagokat iparilag előállítani; először polimerekből, később kerámiákból, üvegekből, fémekből. Napjainkban leginkább a polimerhabok terjedtek el, ám ezek alkalmazhatóságának a kis szilárdság, az alacsony olvadáspont és a tűzveszélyesség szab határt. Fémek habosításával azonban nagy fajlagos szilárdságú, jó energiaelnyelő anyagokhoz juthatunk, amelyek több száz fokos hőmérsékleten is stabilak, ráadásul száz százalékban újrahasznosíthatók. Emellett jó hangelnyelők és alkalmazhatók rezgéscsillapításra, valamint elektromágneses árnyékolásra is [1].

Fémhabokat éppen ezért leginkább a járműiparban használnak; sok helyen alkalmaznak fémhabokat autók lökhárítójában, ajtóinak belsejében, vagy me-revítésként küszöbök belsejében. Ezáltal nemcsak az utasok védelme javul, de jelentős súlycsökkenés – és ezáltal üzemanyag-megtakarítás – is elérhető. Jelenleg alumíniumhabokat használnak például az Audi A8-ban, a Ferrari F430 sportkupékban és a Siemens Combino[®] villamosaiban, buszaiban és vasúti kocsi-jaiban is [2], de terveztek már emelhető munkaállványkart [3] és páncélauto golyóvédő borítását [4] is fémhabokból. Egy másik fontos alkalmazás a hangszigetelés: Japánban például magasutak, viaduktok alját, valamint épületek mennyezetét borítják alumínium habbal [5].

1. ábra. Nyitott (a) és zárt (b) cellás fémhabok keresztmetszeti képe.



A celluláris anyagokat tömör rudak és/vagy lemezek hálózataként lehet elképzelni. A tömör rudakat cellaéleknek, a lemezeket cellafalaknak hívjuk. A háromdimenziós celluláris anyagokat haboknak nevezzük, ha a bennük található szilárd anyag térfogati hányada (a *relatív sűrűség*) nem haladja meg az 50%-ot. Az ennél nagyobb relatív sűrűségű háromdimenziós anyagokat porózus anyagoknak nevezzük. Szerkezetük alapján a habok alapvetően kétfélék lehetnek: *zárt cellásak* vagy *nyitott cellásak* (1. ábra). Zárt cellás szerkezetéről beszélhetünk, ha a cellák üregeit cellafalak határolják. Ellenkező esetben, azaz ha a cellák nyitott cellaoldalakon keresztül érintkeznek, nyitott cellás anyagról beszélhetünk. Természetesen léteznek félig nyitott, félig zárt celluláris szerkezetek is, azonban az ilyen szerkezetek kis jelentőséggel bírnak.

Az első fémhabot 1942-ben *Sosnik* állította elő alumíniumból, és mivel kezdetben csak drága és nehézkes technológiával lehetett fémhabokat előállítani, lassan indult meg a fémhabok iránti ipari érdeklődés, és ezzel együtt a kutatás és a fejlesztés. Azóta azonban számos eljárást dolgoztak ki fémhabok előállítására. Napjainkban szinte majdnem minden fém habosítható, kezdve az acéltól, a titánon, a magnéziumon és a nikkell-szuperötvözeteken át egészen a fémüvegekig.

A leggyakoribb előállítási módszereket négy nagy csoportba foglalhatjuk aszerint, hogy a fém milyen állapotban készítik belőle a fémhabot [6]. Ennek megfelelően készíthetünk habokat olvadékból, porból, fémgőzből és fémionból. E két utóbbi módszert együttesen bevonásos technikáknak is nevezhetjük (1. táblázat). Az alábbiakban ezekből a módszerekből ismertetjük a legfontosabbakat.

1. táblázat		
Leggyakoribb fémhab-előállítási módszerek		
olvadékból történő előállítás	porkohászati módszerek	bevonásos technikák
<ul style="list-style-type: none"> • <i>buborékoltatásos habosítás</i> • <i>habosítás fűvatóanyaggal</i> • <i>granulátumra öntés</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>fémpor habosítása fűvatóanyaggal</i> • habosítás pórusokba zárt gázzal • üreges gömbök szinterelése 	<ul style="list-style-type: none"> • bevonás galvanizálással • bevonás porlasztással • bevonás vákuumpárolgattással

A *dőlt betűvel* kiemelt előállítási módszerekkel a cikkben bővebben foglalkozunk.

2. táblázat

Fémhabok legfőbb fizikai tulajdonságai

Cellaméret	20 nm – kb. 20 cm
Relatív sűrűség	0,003 – 0,5
Rugalmassági modulus	0,02 – 15 GPa
Rugalmasság határa	0,02 – 50 MPa
Hővezetési tényező	0,3 – 35 W/m·K
Fajlagos ellenállás	$9 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$

Buborékolatásos habosítás

Fémolvadékot legegyszerűbben gáz bevezetésével habosíthatunk. Az olvadék belsejében keletkező gáz-buborékok ekkor nagyon gyorsan az olvadék felszínére emelkednek, és „elszöknek”, mivel az olvadék nagy sűrűsége miatt a gázbuborékokra ható felhajtóerő jelentős. Ez a kedvezőtlen jelenség az olvadék viszkozitásának növelésével csökkenthető.

Első lépésként 5–20 μm átmérőjű kerámiaszemcséket (pl. SiC vagy Al_2O_3) kevernek az olvadékhoz, ami nemcsak az olvadék viszkozitását, hanem a keletkező hab stabilitását is megnöveli. Ezután forgólápaton vagy fúvókán keresztül gázt (argont, oxigént vagy nitrogént) nyomnak az olvadékba. A keletkező viszkózus olvadék-buborék elegy az olvadék felszínére emelkedik, ahol stabil folyadékhabot képez, amelyet egy szállítószalag emel ki és továbbít. A folyadékhab lehűtésével zárt cellás fémhabhoz juthatunk. Ezt a módszert Kanadában és Norvégiában alkalmazzák; körülbelül 1000 kg fémhabot tudnak óránként előállítani.

Habosítás fúvatóanyaggal

Ha a buborékokat gázképződés kíséretében bomló anyag (fúvatóanyag) segítségével visszük be az olvadékba, akkor fúvatóanyaggal történő habosításról beszélhetünk. Ebben az esetben is növelni kell az olvadék viszkozitását, amit legtöbbször kalcium hozzákeverésével érnek el. Ezután keverik az alumíniumolvadékokhoz a fúvatóanyagot; a legtöbb esetben titán-hidridet (TiH_2). A titán-hidrid körülbelül 700 °C-on elbomlik. Az ekkor felszabaduló hidrogéngáz fújja fel az olvadékot. A zárt cellás fémhabot ebből hűtéssel kaphatjuk. Az első ilyen eljárást Japánban fejlesztették ki, maximum napi 1000 kg alumíniumhabot tudnak gyártani.

Granulátumra öntés

A módszer lényege, hogy egy öntőformába olyan szerves vagy szervetlen (például só, perlit) szemcséket vagy üreges gömböket helyezünk, amelyek a fém olvadáspontján még stabilak. A szemcsékre vagy üreges gömbökre ezután olvadt fémet öntünk. A szemcsék közti pórusokba az olvadékot inert gáz segítségével létrehozott túlnyomás, vagy az öntőforma alján alkalmazott vákuumszívás préseli be. Hűtéssel fémsemce kompozithoz jutunk. Amennyiben a kompo-

zitból eltávolítjuk a szemcséket (szerves szemcsék esetén hőkezeléssel, sószemcsék esetén a só vízzel történő kioldásával) nyitott cellás, ellenkező esetben zárt cellás fémhabhoz jutunk. Ezt az előállítási módszert Magyarországon és Svájcban is alkalmazzák.

Fémpor habosítása fúvatóanyaggal

Ezzel a módszerrel tetszőleges alakú fémhabot készíthetünk, amelyet vékony, tömör fémréteg borít – ez sok alkalmazásnál előny. Először összekeverik a fémport (pl. alumínium) és a fúvatóanyagot, ami a legtöbbször titán-hidrid. Majd a keverékből extrudálással, tömörítéssel vagy egyéb eljárással masszát, úgynevezett prekurzort készítenek. A prekurzort beteszik a kívánt alakú öntőformába, majd körülbelül 700 °C-ra hevítik. Ebben az esetben is a fúvatóanyag elbomlásakor keletkező hidrogéngáz fújja fel a már olvadt fémet.

Bevonásos módszerek

A bevonásos módszereknél nyitott cellás műanyaghab szerkezetét másolják le úgy, hogy a műanyaghab cellaéléire vékony fémbevonatot képeznek különböző technológiákkal (katódporlasztással, vákuumpárologtatással vagy galvanizálással), majd hőkezeléssel eltávolítják a műanyaghabot. A keletkező nyitott cellás fémhab élei így üregesek lesznek, ezeket általában szintereléssel tömörítik. A legkisebb sűrűségű fémhabok ezekkel a módszerekkel állíthatók elő.

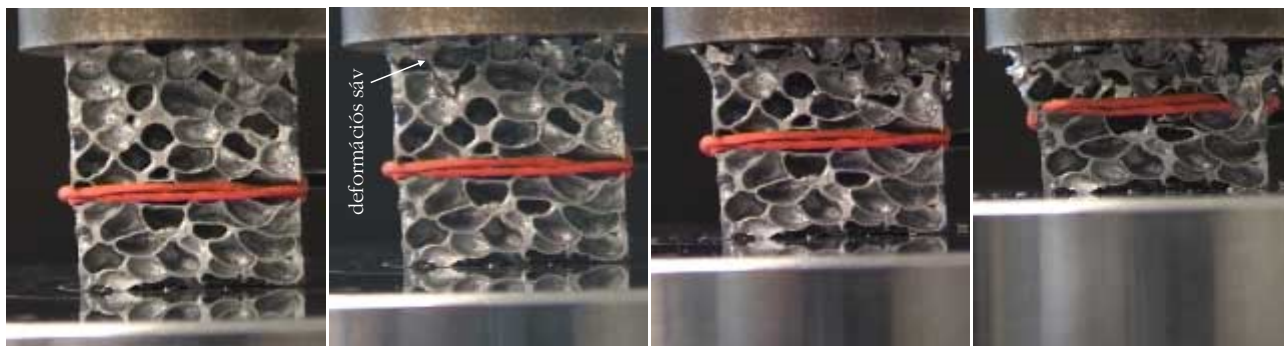


A különböző előállítási módszereknek köszönhetően a fémhabok fizikai tulajdonságai széles skálán mozognak (2. táblázat). A cellák nagysága nanohaboknál lehet akár 20 nm is, de általában néhány százmikronos, milliméteres, vagy néhány centiméteres cellájú fémhabokkal találkozhatunk. A fémhabban lévő fém térfogati hányada, a *relatív sűrűség* is tág határok között mozog: a legkisebb sűrűségű fémhabokban a fém térfogata alig 0,3%-át teszi ki az anyag térfogatának.

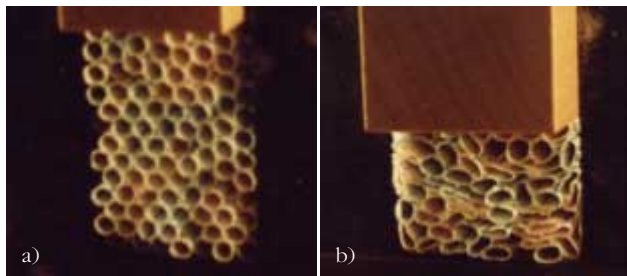
A legtöbb fémhab összenyomás során jellegzetesen, úgynevezett *deformációs sávok* kialakulásával deformálódik. Ez azt jelenti, hogy (egy rövid, homogénnek tűnő deformáció után) kiválasztódik egy cellaréteg, amelyben a cellák összeroppannak, azok a cellák azonban, amelyek nincsenek ebben a rétegben, lényegében nem deformálódnak (2. ábra). Emiatt az összenyomáshoz szükséges erő ebben a szakaszban közel konstans.

A fémhaboknak – és más celluláris szerkezetű anyagoknak ez a sajátossága egyszerűen szemléltethető a szívószálmodellel (3. ábra). Szívószálakat párhuzamosan téve egymásra összenyomás során kialakul egy, az összenyomás irányára merőleges szívószálréteg, amelyben a szívószálak összetörnek. A rétegen kívüli szívószálak épek maradnak egészen addig, amíg ki nem alakul egy olyan deformációs sáv, amely keresztülhalad ezeken a szívószálakon.

A fémhab összenyomási deformációs görbéje (erő-elmozdulás görbéje) így három részből áll: egy kezdeti, lineárisnak tekinthető szakaszból, az ezt követő hosszú



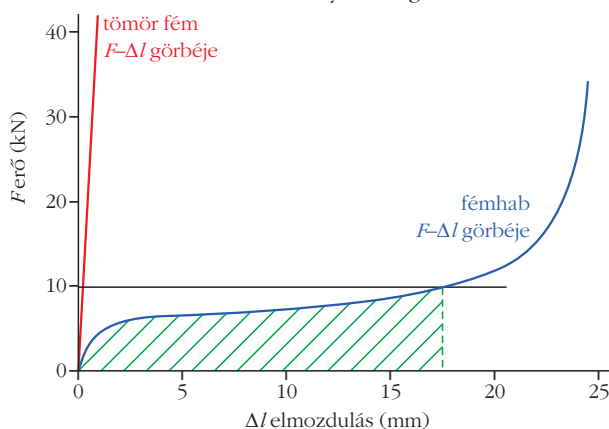
2. ábra. Buborékoltatásos habosítással készített hab alakváltozása összenyomás során. (A piros befőttesgumival egy akusztikus detektort rögzítettünk a minta felületéhez.)



3. ábra. Celluláris szerkezetek összenyomásának modellezése szívszálakkal: (a) a terheletlen szerkezet, (b) a függőlegesen összenyomott szerkezetben a középső régióban ellapult szálak, míg a szélső részekben alig deformált szálak láthatók.

platószakaszból, és végül az úgynevezett denzifikációs szakaszból, amelyben a már összeroppant cellák tömörödése megy végbe (4. ábra). Ennek a hosszú platószakasznak köszönhető, hogy a fémhabok (és általában más habok is) jó ütközésienergia-elnyelők. A fémhabok ugyanis viszonylag sok energiát nyelnek el összenyomásuk közben anélkül, hogy a bennük ébredő átlagos feszültség vagy erő egy adott határon túllépne. Ezt illusztrálja a 4. ábra, ahol azonos külső geometriájú tömör fém, valamint fémhab összenyomási görbéje talál-

4. ábra. Fémhabok és tömör fémek összenyomási görbéje. A zölddel vonalazott terület a hab által elnyelt energia.



ható. Látható, hogy például 10 kN-os erőhatárig a fémhab által elnyelt mechanikai energia, ami az erő-elmozdulás diagram alatti terület, több nagyságrenddel nagyobb, mint amit a tömör fém nyel el.

A fémhabok természetesen nemcsak energia-elnyelőként alkalmazhatók, hanem nagy fajlagos szilárdságuk miatt könnyűszerkezetű merevítők, tárolók is készíthetők belőlük. Ezeknél az alkalmazásoknál főleg zárt cellás habokat használnak. Nyitott cellás fémhabokból szűrők, hőcserélők, elemek, elektródák, katalizátorhordozók, áteresztő védőmembránok, optikai tükrök stb. készíthetők [7].

A fémhab napjainkban már az egyik legkorszerűbb anyagnak számít sokoldalú felhasználhatósága miatt. Nemcsak a Földön, hanem űrhajókon, űrkompokon is használják. Tömegtermelésük beindulásával áruk is jelentősen csökkent, így megjelentek a mindennapi alkalmazásokban is. Ennek ellenére sok alapvető kérdés – mind a fémhabok előállításával, mind a tulajdonságaival kapcsolatban – még nem tisztázott, és aktív tudományos és mérnöki kutatás tárgyát képezi.

Kádár Csilla, Kenesei Péter

ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

Irodalom

1. H. P. Degischer, B. Kriszt (szerk.): *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Applications*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
2. K. E. Geyer, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 25–30.
3. H. W. Seeliger, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 5–12.
4. J. Jery, F. Simančík, M. Bortel, S. Kubo, J. Kovačik, In: *Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23–25 June 2003, Berlin*. (szerk.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen) Verlag MIT Publ., Berlin (2003) 43–46.
5. T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara, *Advanced Engineering Materials*, 2 (2000) 179–183.
6. J. Banhart, *Progress in Material Science*, 46 (2001) 559–632.
7. <http://www.ergaerospace.com>

