

# fizikai szemle

A group of scientists, including an older man in the foreground adjusting his glasses, are looking upwards at a large, complex, circular scientific instrument, likely a particle detector, in a laboratory setting. The instrument is composed of many layers of metal and electronic components, arranged in a circular pattern. The scientists are wearing hard hats and safety glasses, indicating a high-tech and potentially hazardous environment. The lighting is focused on the instrument, creating a dramatic effect.

2008/9

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:

Szeptemberben 10-én megkezdte  
próbaüzemét a Nagy Hadronütköztető,  
a világ legnagyobb gyorsítója,  
amelynek egyik legfőbb feladata  
a Higgs-bozonok megtalálása.  
Képünkön Peter Higgs a még épülő  
berendezést tekinti meg.  
(Foto: Maximilien Brice, CERN)

A bátsó borítón:

„Fizika-show” iskolásoknak  
a Szent László Általános Művelődési  
Központban, Baján.

## TARTALOM

<i>Patkós András:</i> Entrópia, Planck, Univerzum	281
<i>Trampus Péter:</i> A reaktortartály biztonságának elemzése	287
<i>Barnafieldi Gergely Gábor, Varga Dezső:</i> GEM, avagy új trend a részecske-detektorok világában	292
<i>Sós Katalin:</i> A talaj és az útburkolatok radioaktív sugárzása	296
<i>Veszely Gyula:</i> Áramvezetőhöz kapcsolódó felületi töltés és külső villamos tér	300
<i>Oláb-Gál Róbert:</i> Bolyai János egyik leghosszabb fizika tárgyú kéziratáról	302
<i>Berényi Dénes:</i> Alapvető fontosságú eredmények az atomfizikában	304

### VÉLEMÉNYEK

<i>Bencze Gyula:</i> Tudásalapú társadalom?	307
---	-----

### A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Jaloveczki József:</i> Kétnapos „fizika-show” az iskolában	309
<i>Eichhardt Iván, Jaloveczki József:</i> Fizikázunk egyszerűen, számítógéppel	311

### HÍREK – ESEMÉNYEK

	316
--	-----

### KÖNYVESPOLC

	320
--	-----

<i>A. Patkós:</i> Entropy, Planck, Universe	
<i>P. Trampus:</i> The safety of reactor vessels	
<i>G. G. Barnaföldi, D. Varga:</i> GEM – a new trend in the world of particle detectors	
<i>K. Sós:</i> The radioactivity of soil and the coating of roads	
<i>Gy. Veszely:</i> The surface charge on current-carrying objects and its external electrical field	
<i>R. Oláb-Gál:</i> J. Bolyai's longest manuscript dealing with physical problems	
<i>D. Berényi:</i> Results of fundamental significance in atomic physics	

### OPINIONS

<i>Gy. Bencze:</i> Knowledge as a base of society?	
--	--

### TEACHING PHYSICS

<i>J. Jaloveczki:</i> A two-day “Physics Show” for schools	
<i>I. Eichhardt, J. Jaloveczki:</i> Let's study physics the simplest way: using only a computer	

### EVENTS, EVENTS

<i>A. Patkós:</i> Entropie, Planck, Weltall	
<i>P. Trampus:</i> Die Sicherheit der Behälter von Reaktoren	
<i>G. G. Barnaföldi, D. Varga:</i> GEM – Neue Tendenzen der Entwicklung von Teilchendetektoren	
<i>K. Sós:</i> Die Radioaktivität des Bodens und der Pflasterungen von Verkehrsstraßen	
<i>Gy. Veszely:</i> Oberflächen-Ladungen auf Strom führenden Leitern und das äußere elektrische Feld	
<i>R. Oláb-Gál:</i> J. Bolyais längstes Manuskript über Probleme der Physik	
<i>D. Berényi:</i> Ergebnisse von fundamentaler Wichtigkeit in der Atomphysik	

### MEINUNGSÄUSSERUNGEN

<i>Gy. Bencze:</i> Wissen als Grundlage der Gesellschaft?	
---	--

### PHYSIKUNTERRICHT

<i>J. Jaloveczki:</i> Zweitägige Physik-Schau für Schulen	
<i>I. Eichhardt, J. Jaloveczki:</i> Treiben wir Physik ganz einfach: mit einem Rechner	

### EREIGNISSE, BÜCHER

<i>A. Патков:</i> Энтропия, Планк, Вселенная	
<i>П. Трампус:</i> Анализ надежности реакторных баков	
<i>Г. Г. Барнафöldи, Д. Варга:</i> GEM – Новый подход в мире детекторов элементарных частиц	
<i>К. Шош:</i> Радиоактивность грунта и покрытий дорог и магистралей	
<i>Д. Весели:</i> Заряды на поверхностях тел несущих ток и их внешнее электрическое поле	
<i>Р. Олах-Гал:</i> Рукопись Яноша Бояи по физическим вопросам	
<i>Д. Берени:</i> Результаты фундаментальной важности в атомной физике	

### ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ

<i>Д. Бени:</i> Общество на основе знаний?	
--	--

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

<i>Й. Яловецкий:</i> Двухдневное продемонстрирование физики для школ	
<i>И. Эйхгард, Й. Яловецкий:</i> Простейший способ физических студий: с одним только компьютером	

### ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, КНИГИ

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 Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVIII. évfolyam

9. szám

2008. szeptember

## ENTRÓPIA, PLANCK, UNIVERZUM

Patkós András  
ELTE, Atomfizika Tanszék

### A Planck-törvény termodinamikai háttere

A termodinamika kivételes fizikai elmélet. Célkitűzése a makroszkopikus testek energiacsereivel járó folyamatoknak jellemzése. Eredetileg ezt a célt a belső szerkezetre, a mikroszkopikus szabadsági fokokra történő bármiféle utalás nélkül kívánja elérni. Ennek köszönhető eredményei alkalmazhatóságának széles tartománya, *univerzalitása*. Sok esetben meglepően erős megszorítást jelentő következtetések nyerhetők módszerével a mikroszkopikus szerkezetre is.

Alapegyenlete valamely egyszerű mechanikai rendszer és környezete között kvázisztatikusan zajló energiacsere előtti folyamatok során az egyszerű rendszerben bekövetkező állapotváltozást korlátozó összefüggést fogalmazza meg:

$$T dS = dE + p dV.$$

Itt  $T$  a test hőmérséklete,  $p$  a nyomása,  $dE$  a rendszer belső energiájának,  $dV$  a térfogatának infinitezimális megváltozása. A mechanikai munkavégzés és a belső energiaváltozás eredőjeként adódó infinitezimális hőcsere az entrópia  $dS$  megváltozása kontrollálja.

Az entrópia ezen bevezetése *Rudolf Clausius* műve. Az első lépést megtevő *S. Carnot* és Clausius (*1. kép*) nyomán a fizikusok a hőerőgépek hatásfoka növelésének feladatára koncentráltak, és az entrópiát elsősorban a munkává alakítható energiában bekövetkező veszteség szempontjából vizsgálták. Clausius mondta ki a mechanika törvényeire vissza nem vezet-

hető állítást, miszerint zárt rendszerben az entrópia egyetlen természeti folyamatban sem csökkenhet:

$$dS \geq 0.$$

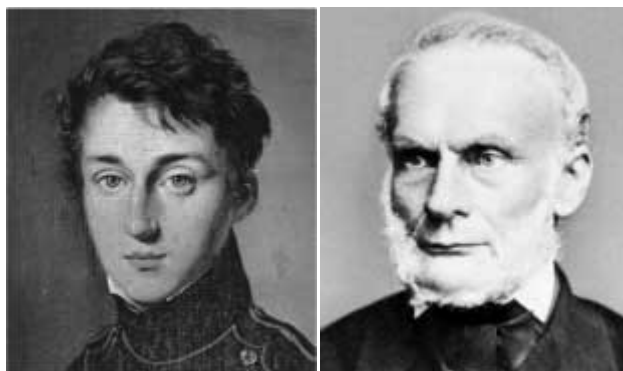
A kvázisztatikus hőcsere egyenletének integrálásával meghatározható egy folyamatfüggetlen, valamint a mechanikai és elektromágneses állapotváltozóktól is független makroszkopikus állapotváltozó, az entrópia:

$$S = S(E, V) + S_0.$$

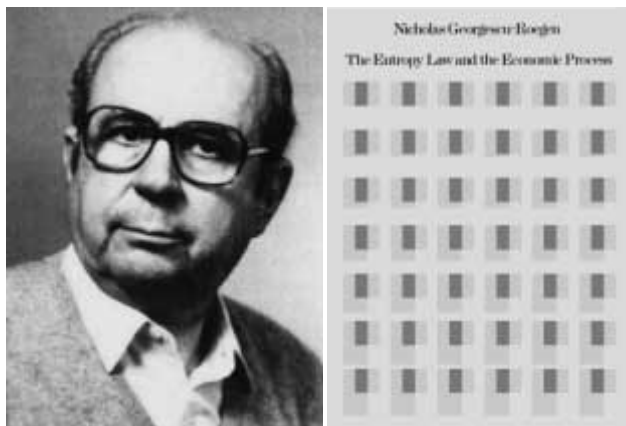
Ennek integrációs állandóját a harmadik főtétele nullára rögzíti az abszolút hőmérsékleti skála nullapontjában.

A termodinamika a nem-redukcionista (azaz a jelenségeket kisebb alkotórészek közötti folyamatokra visszavezetni nem kívánó) fizika nagyszerű teljesítménye. A redukcionista megközelítéstől való tartózkodás az az erény, amely egyéb, összetett nem-fizikai rend-

1. kép. Sadi Carnot (balra) és Rudolf Clausius (jobbra)



Az MTA Fizikai Osztály és az ELFT által Max Planck születésének 150. évfordulójának tiszteletére rendezett emlékülésen elmondott előadás írott változata.



2. kép. Nicholas Georgescu-Roegen és 1971-es könyvének címlapja

szerek (gazdaság, társadalmi szervezet stb.) kutatóit arra ösztönözte, hogy saját területükön analóg leírást keressenek, egyszerű szabadsági fokokat azonosítsanak, és egyenlőtlenség-alakú, változási irányt jelző összefüggésre jussanak. Megemlíthető *Nicholas Georgescu-Roegen* (2. kép), aki 1971-ben publikálta *Az entrópiatörvény és a gazdasági folyamat* című könyvét. Ez a könyv nagy hatással volt az *ökológiai gazdaságtan* irányzatának létrejöttére, amely a természeti és emberi erőforrásokkal létrehozható gazdasági értéket az erőforrások állapotának reprodukálása mellett kívánja optimalizálni.

A termodinamikuskok mindmáig élénk vitája a termodinamika második főtételéhez vezető axiómák pontos megfogalmazását, a törvény alá vetett folyamatok egyértelmű körülhatárolását célozza. Ebben a tisztázó folyamatban *Max Planck* is aktívan részt vett, többek között 1897-ben kiadott tankönyvével, valamint a termodinamika harmadik tételének és az abszolút hőmérséklet fogalmának elfogadtatásáért tett erőfeszítéseivel. Érdemes felfigyelni arra, hogy még élete végén írott tudományos életrajzában [1] is hangsúlyozza, hogy milyen nehézségbe ütközött a Carnot-körfolyás levezetésére használt, a kalorikumelmeletet tükröző eredeti vízimalom-hasonlatnak (3. kép) kiszorítása a fizikusok gondolkodásából.

A termodinamika redukcionista megközelítése a *Ludwig Boltzmann* által javasolt statisztikus mechanikai megalapozással jelentkezett, amelynek lényegét éppen Planck öntötte tömör, és a mechanikai rendszerekről továbblépő általánosítást lehetővé tevő formába:

$$S_N = k_B \ln W_N,$$

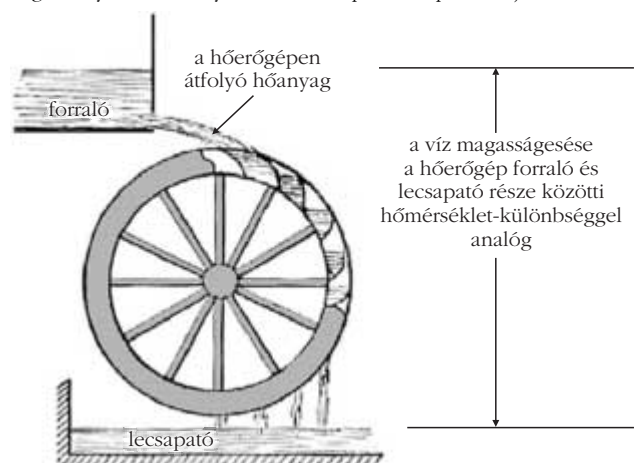
ahol  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K. A kulcskérdés a  $W_N$  mennyiség meghatározásának, azaz egy rendszer valamely rögzített belső energiájú makroállapotát megvalósító mikroállapotok leszámolásának mozzanata. Ez a lépés két kritikus kérdést hordoz magában. Az első: az adott állapot szempontjából alapvetőnek tekinthető alkotórészek (szabadsági fokok) azonosítása. A második: a szabadsági fokok diszkrétizálása, ami leszámolhatóságuk előfeltétele.

A termodinamikuskok sokáig kritikusan vélekedtek a mechanika időtükrözésre szimmetrikus törvényeit a valószínűségi megközelítéssel ötvöző statisztikus mechanikai irányzat és a termodinamika összekapcsolhatóságáról. Szerepet játszott a *molekuláris rendezetlenség* kiegészítő fogalmának kialakításában, amely a mechanika törvényein túllépő feltétel a folyamatok időirányának meghatározottságára vezető H-tétel alkalmazhatóságára. Tudományos felfogásban ezért igazi személyes fordulatnak tűnik, hogy az elektromágneses térrel termikus egyensúlyban lévő abszolút fekete test sugárzási spektrumának értelmezéséhez a Boltzmann-féle valószínűségi entrópiafogalomra épülő elméletet dolgozott ki.

Ebben a jelenségben is, mint a termodinamika egész konstrukciójában, valószínűleg az univerzalitás ragadta meg. Ma ezt úgy fogalmazhatjuk, hogy a hőmérsékleti sugárzás spektruma független attól, hogy a laboratóriumban gondosan hőszigetelt, tükröző falú tartály belsejében elhelyezkedő szén szemcse sugárzása, vagy a Világegyetem egészét kitöltő elektromágneses állóhullámok valószínűsítik-e meg.

E felismerés alapján Planck a végeredmény szempontjából közömbös modellre választott: egyetlen, elektromosan töltött harmonikus oszcillátor kölcsönhatását vizsgálta az abszolút fekete testet megvalósító üregrezonátor elektromágneses állóhullámaival. Termodinamikusként eltért kortársai megközelítésétől, amely közvetlenül az üreg/oszcillátor kis frekvenciatartománybeli energiasűrűségének meghatározására irányult. Tudván, hogy az entrópia a rögzített térfogatú rendszerben az energiának egyértelmű függvénye,  $N$  darab  $\nu$  frekvenciájú oszcillátor halmazára érvényes entrópia-energia összefüggés megalkotását tűzte ki céljává. Boltzmann fenti képletét használta kiindulásul. A feladat  $N$  oszcillátor  $NE$  összenergiájú makroállapotához tartozó mikroszkopikus állapotok  $W_N$  számának meghatározása volt. Erre irányuló próbálkozásai során, a leszámolhatóság biztosítására folyamodott az energiakvantálás „kétségbeesett” feltevéséhez:

3. kép. Carnot vízimalom-hasonlata hatásfok képletének levezetésére tipikus példája az elméleti fizikusok oly gyakran elvileg hibás, de végül helyes eredményt adó modellépítő kompetenciájának



$$NE = P\varepsilon.$$

Itt  $\varepsilon$  a kvantált energiacsomag nagysága,  $P$  pedig a teljes energia csomagokba osztásával adódó csomagszám. Nagyon nagyszámú oszcillátorhoz nagyon nagy  $P$  érték kell. Ebben a határesetben *Stirling* képlete segítségével értékelte ki  $W_N$  kombinatorikai képletét, amellyel eljutt az egyetlen oszcillátor entrópiájának képletéhez:

$$S = k_B \left[ \left( 1 + \frac{E}{\varepsilon} \right) \ln \left( 1 + \frac{E}{\varepsilon} \right) - \frac{E}{\varepsilon} \ln \left( \frac{E}{\varepsilon} \right) \right].$$

Miután a termodinamikában az entrópiának a belső energia szerinti parciális deriváltja adja a  $T$  hőmérséklet reciprokát, a fenti képletből adódik

$$\frac{1}{T} = \frac{k_B}{\varepsilon} \left[ \ln \left( 1 + \frac{E}{\varepsilon} \right) - \ln \left( \frac{E}{\varepsilon} \right) \right].$$

Ebből azután kifejezhető az oszcillátor  $E$  belső energiája  $T$  hőmérsékleten, amit az oszcillátorok állapot-sűrűségével megszorozva Planck megkapta a róla elnevezett sugárzási törvényt. (Hallgatólagosan persze feltette, hogy termikus egyensúlyban az oszcillátorral képviselt abszolút fekete test és az azt övező sugárzás energiája a spektrum minden vonalára egyezik.) A kapott összefüggésnek a Wien-törvénnyel való összevetése is szükséges még, ami végül megköveteli az energiakvantumra az

$$\varepsilon = h\nu$$

arányosságot.

Közismert, hogy Planck jelentős, de hiábavaló erőfeszítést tett az energiakvantálási feltételtől való megszabadulásra. Ez a törekvés érthető, hiszen a fentiek szerint ő pusztán a szabadsági fokok (a mikroállapotok) megszámlálhatósága érdekében diszkretizálta az oszcillátorhalmaz energiáját. *Einstein* és követői a legkülönfélébb anyagi rendszerek elemi oszcillátorként viselkedő szabadsági fokaira alkalmazták a kvantálás eljárását. A szilárd testek fajhőjétől a fényingadozások statisztikájáig siker sikert követett.

Az entrópia megszületésétől a sugárzás entrópiájáig vezető, fél évszázadot átfogó történet összefoglalásul idézni kívánom *Varró Sándor* kommentárját [2], amelyet Max Plancknak az 1911-es Solvay-konferencián tartott előadására alapozott: „Az energia kvantált-ságának gondolata Boltzmann-nak 1872-ben és 1877-ben megjelent munkáira vezethető vissza. Bár Boltzmann pusztán matematikai eszköznek tekintette a diszkrét elemi energiacsomagokat, mégis második cikkében – amelyben elvégezte a (termodinamikai) valószínűség kombinatorikai elemzését és kiszámította annak maximumát, megkapta a gáz molekulái által hordozott energiacsomagok (Bose-)eloszlását. Planck megjegyezte, hogy a kombinatorikus megvalósítások teljes száma, illetve azok maximális valószínűséggel bekövetkező konfigurációinak száma között a különbség elhanyagolható lévén, Boltzmann eredménye egyezik az ő entrópiaképletével.”

## Az Univerzum entrópiája és a fekete lyukak

Az Univerzum egészére érvényes, a gravitációt is magába foglaló termodinamika lehetőségét sokan vitatják, ám *Stefan* és Boltzmann képletével, amelynek együtthatóját Planck sugárzási törvénye meghatározza, könnyen kiszámítható az egykor létezett termikus egyensúlyból lecsatolódtott, azóta kölcsönhatásmentes ideális gázként hűlő kozmikus fotonok és neutrínók által hordozott entrópia. A termodinamikai entrópia sűrűsége a hőmérséklet harmadik hatványával arányos. A  $10^{28}$  cm méretű eseményhorizontunk belsejében 2,725 K hőmérsékletű fotongáz és 1,96 K hőmérsékletű neutrínógáz mindegyike az önmagában nehezen elképzelhető óriási nagyságrendet képviselő  $10^{88}$  entrópiát hordozza ( $k$  egységben számolva!). A gravitációs energia hipotetikus kvantumai jóval korábban csatolódtak le, egyensúlyi gázuk ezért kisebb,  $10^{86}$  entrópiát hordozhat. Amennyiben nem állt fent termikus egyensúly a lecsatolódtásuk pillanatában, akkor entrópiájuk e becslésnél kisebb.

Az Univerzumban található nem-relativisztikus állapotú, elektromágneses sugárzást kibocsátó anyag entrópiája az anyag-antianyag aszimmetria értéke alapján becsülhető meg. Ezt az információt először a könnyű elemek összetételének elméletéből nyerhető kozmikus előfordulási gyakoriságoknak a csillagászati mérésekkel való összevetéséből sikerült kihámozni. Értéke érzékenyen befolyásolja a kozmikus háttérsugárzás észleléseit is, így ma legpontosabban a háttérsugárzási mérésekből ismert a nem-relativisztikus anyagsűrűségnek a háttérsugárzás entrópiájához viszonyított értéke:  $N(\text{anyag})/S(\text{foton}) \approx 10^{-9}$ . Az entrópiának az anyagmennyiséggel való arányossága (extenzivitása) miatt  $S(\text{anyag}) \approx 10^{79}$ . Az Univerzum energiasűrűségét domináló sötét anyag és sötét energia entrópiatartalmáról egyelőre nincs információ. Annnyit tudunk, hogy a sötét anyag mennyisége nagyjából hatszorosa a világítani képesnek. Amennyiben nem-relativisztikus nehéz elemi részek alkotják, amint azt a szuperszimmetrikus világra vonatkozó elméleti konstrukciók sugallják, akkor entrópiatartalma legfeljebb egy-két nagyságrenddel lehet nagyobb az elektromágnesesen világító anyagénál. A sötét energia gravitációs hatását mai ismereteink szerint teljesen jól leírja a nem-zérus kozmológiai állandó feltételezése. Miután ebben az állandóban feltevés szerint nincs statisztikai viselkedés, entrópiája zérus. Az utóbbi két kategória természetének részletesebb megismerése entrópiatartalmukat illetően is jelentős módosulásokat eredményezhet.

Mindezek a becslések a forró Univerzumban egykor fennálló termodinamikai egyensúlyból kiinduló termikus történethez kapcsolódnak. A statisztikus Boltzmann-definíció egy kiterjesztését használva azonban az entrópia fogalmát az 1970-es években sikerült alapvetően általánosítani. Az alább ismertetendő fejlemények alapján ma úgy tűnik, hogy az Univerzumban a szupermasszív fekete lyukak entrópiatartalma a meghatározó.

Jacob Bekenstein (4. kép bal oldalán) 1973-ban, 26 éves korában írta meg tudománytörténeti jelentőségű *Black Holes and Entropy* című cikkét [3]. A hagyományos termodinamika keretei között fekete lyukakhoz kapcsolható entrópiaparadoxonra J.A. Wheeler (4. kép jobb oldalán) figyelt fel, és Bekenstein számára PhD-témának adta a kérdéskört. Meg kellett értenie, hogy hová lesz a fekete lyukba behulló anyag entrópiája. Bekenstein Hawking munkáját használta kiindulásként, aki általános tétel szintjére emelte Wheeler másik diákjának, Christodoulounak bizonyos, az egzakt fekete lyuk megoldások fejlődésére vonatkozó észrevételét. Hawking tétele szerint *a fekete lyuk eseményhorizontja felületének területe bármely folyamatban csak nőhet* (az eseményhorizonton belülről induló fényjelek véges idő alatt nem jutnak ki a külvilágba). Például két fekete lyuk összeolvadásakor a létrejövő állandósult állapotú objektum (eseményhorizontjának) felülete nem lehet kisebb a két kiinduló fekete lyuk (eseményhorizontjai) felületének összegénél. Bekenstein cikke bevezetésében megjegyzi, hogy „mindez a termodinamika második tételére emlékeztet. . . , a hasonlóság alapján érdemes a fekete lyukak fizikáját termodinamikai szempontból vizsgálni”.

Cikkében javaslatot tett a fekete lyukak entrópiájának és felületének arányos mennyiségként történő azonosítására, és ezzel sikeresen általánosította a termodinamika második tételét a fekete lyukak részvételével zajló folyamatokra. Bekenstein entrópiaképlete a következő:

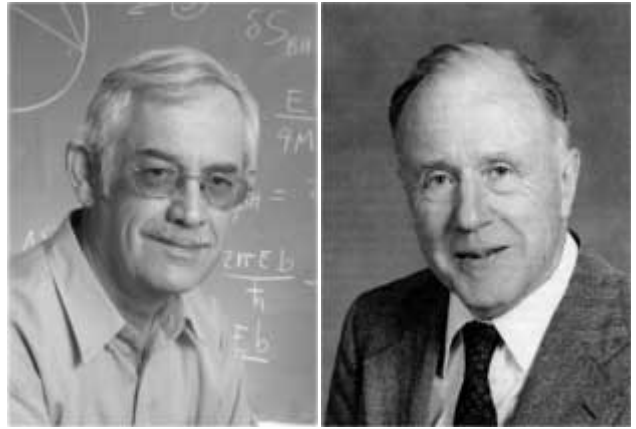
$$S_{\text{fekete lyuk}} = \frac{2\pi\eta A k_B c^3}{Gh},$$

ahol  $A$  a fekete lyuk eseményhorizontjának a felülete,  $c$  a fénysebesség,  $G$  a Newton-féle gravitációs állandó,  $h$  pedig a Planck-állandó.  $\eta$  dimenziótlan arányossági tényező. A kvantumosságot jellemző  $h$  állandó megjelenését az entrópia és a felület mértékegysége közötti átváltás indokolja. Ez az egyetlen univerzális természeti állandó, amely a jó dimenziót adja.

Az ismeretlen  $\eta$  számegegységűt Bekenstein a C.E. Shannon által bevezetett  $I$  informatikai entrópiára támaszkodva becsülte meg, amelynek definíciója

$$S_{\text{információ}} = -k_B I = -k_B \sum_n p_n \ln p_n.$$

Itt  $p_n$  a vizsgált rendszer állapotai közül az  $n$ -ik megvalósulási valószínűsége. Egy bit információhoz  $\ln 2$  informatikai entrópia társítható, ha a rendszert kétállapotúnak választva a két alternatív állapotról egyenlő valószínűséget tételezünk fel. Bekenstein egyrészt megbecsülte egy pontszerű tömeg elnyelésénél bekövetkező felületnövekedés alsó korlátját, másrészt a horizont mögötti eltűnésével járó információcsökkenést ráérzéses alapon 1 bitnek választotta. A fekete lyuk entrópiánövekedését az informatikai entrópiacsökkenéssel téve egyenlővé jutott az



4. kép. Jacob Bekenstein (balra) és John Archibald Wheeler (jobbra)

$$\eta \approx \frac{\ln 2}{4}$$

közelítő becslésre, amelynek egzakt értékét végül Hawking számolta ki. Szokás ezért Bekenstein–Hawking-entrópiát is emlegetni.

A fekete lyukakat az úgynevezett „kopaszági tétel” miatt kisszámú makroszkopikus adatuk, azaz tömegük, elektromos töltésük, teljes impulzusmomentumuk kimerítő mértékben jellemzi a külső megfigyelő számára. Belső szerkezetükről semmiféle további információ nem nyerhető, például teljesen érdektelen, hogy adott tömegű fekete lyuk milyen folyamat eredményeképpen alakult ki, eseményhorizontjának belsőjében a különféle töltésjellegű mennyiségek hogyan oszlanak el. Bekenstein javaslata szerint entrópiájuk mintegy a belső szerkezetre vonatkozó információ hiányának mértékét adja meg. Cikkében több, részletesen elemezhető példán mutatta meg, hogy egy fekete lyukba behulló, a tömegpontnál bonyolultabb, de még mindig igen egyszerű fizikai rendszer (pl. egy harmonikus oszcillátor) a teljes rendszer (fekete lyuk + oszcillátor) általánosított entrópiájának növekedését eredményezi. Az egyensúly fennállására vonatkozóan semmiféle előfeltevést nem tett. A hagyományos és a fekete lyukakra bevezetett új entrópia összegének változási irányára vonatkozó kijelentés az *általánosított második törvény*.

Kvázisztatikus tömegelnyelésre azon észrevétel alapján terjesztette ki a második főtétel differenciális alakját, miszerint az ismert Schwarzschild-megoldásban a fekete lyuk eseményhorizontjának sugara arányos annak tömegével. Miután a tömeget belső energiaként értelmezte, a megváltozás energiamérlege azt diktálja, hogy

$$dM_{\text{fekete lyuk}} = T dS_{\text{fekete lyuk}}$$

Ezzel viszont hőmérséklet is értelmezhető a fekete lyukakra. A Schwarzschild-megoldás szerint ugyanis egy nem-forgó fekete lyuk Bekenstein-entrópiája a tömeg négyzetével arányos. Ezért a fenti képlet alapján a fekete lyuk Hawking-hőmérséklete annak tömegével fordított arányban változik.



5. kép. A gravitációelméleti fogadási esélyeket latolgatók (balról jobbra): Kip Thorne, John Preskill és Stephen Hawking

Az egyensúlyi állapotot egy statisztikus mechanikai rendszerben a kezdeti állapottól független, univerzális eloszlású állapot jellemzi. Az egyensúlyból kitérített rendszerek tapasztalat szerint véges idő alatt relaxálnak az egyensúlyi állapotba. Miután a fekete lyuk hőmérsékleti sugárzása egyensúlyi jellege miatt a korábbi (a lyukba való behullás előtti) információt „elfelejti”, Hawking feltételezte, hogy az elemi kvantumfolyamatokra érvényes úgynevezett unitaritási tulajdonság (az együttes valószínűség megmaradása) sérül. Erre kötött fogadást Kip Thorne-nal és John Preskill-lel (5. kép) valamikor a hetvenes évek végén, amire még visszatérünk.

A fekete lyukak előfordulási gyakorisága és jellemző tömege alapján az általuk hordozott entrópiára könnyen kapható becslés. Csillagászati megfigyelések alapján gyanítható, hogy minden galaxismagban, akár csak a mi galaxisunkban, egy szupermasszív, a Nap tömegének tízmilliószorosát tartalmazó fekete lyuk helyezkedik el. Az Univerzum belátható részében található galaxisok számát  $10^{11}$ -re becsülik. Bekenstein képletét alkalmazva a fekete lyukak teljes entrópiájára az

$$\frac{S_{\text{fekete lyuk}}}{k_B} \approx 10^{102}$$

becslés adható. Levonható a tanulság, hogy az ismert anyagi alkotórészeknek az entrópiához adott termikus járulékat a fekete lyukaknál figyelembe vett információvesztésből származó járulék sok nagyságrenddel felülmúlja. Felmerül a kérdés, egyáltalán van-e felső korlát az Univerzum entrópiájára?

## Hologram a világ! (?)

Világunk fundamentális alkotóelemeit a kvantumtérelmélet háromdimenziós ráccsal modellezi, amelynek rácspontjaihoz, illetve a szomszédos rácspontokat összekötő élekhez társítja az önálló, bár egymással kölcsönható, szabadsági fokokat. A rácspontok távolságát az  $l_{\text{Planck}}$  Planck-hosszal becsülhetjük; az ennél kisebb hosszúságnak egyszerűen nincs értelme, hi-

szén a hosszúság a gravitáció által meghatározott téridő-metrika része, és ez alatt a hosszúság alatt a kvantumingadozások szétkenik a klasszikus téridő-geometriát. A Planck-hosszúság  $10^{-35}$  m.

Egy szabadsági fok állapotának ismeretéhez 1 bit információt rendelve a látható Világegyetem  $V$  térfogatának ( $k_B$  egységben számolt) Boltzmann–Shannon-entrópiájára

$$\frac{g_* V \ln 2}{l_{\text{Planck}}^3}$$

becslés adható.  $g_*$  az egy rácsponthoz tartozó szabadsági fokok száma. Ez a részecskefizika Standard modellje szerint nagyjából száz körüli szám. Ezzel a megközelítéssel az Univerzum informatikai entrópiáját  $10^{102}$ -re becsülnénk. A szuperszimmetrikus sötét anyaggal kiegészített elmélet legfeljebb egy nagyságrenddel növelheti meg ezt a becslést.

Bekenstein 1994-ben felhívta a figyelmet arra, hogy valamely térrészben növelve az ott koncentrált energiát (az elemi részek nyelvén: a részecskesűrűséget) elérünk egy határt, amikor a tartomány fent vázolt térelméleti leírása értelmét veszti, mert a térrész fekete lyukká alakul [4]. A következő gondolat kísérletet elemezte: Képzeljünk el egy tértartományt, amelynek entrópiája nagyobb, mint az ahhoz a térrészhez tartozó fekete lyuké. Ha nincs ott egy fekete lyuk, akkor fel kell tételeznünk, hogy azért nincs, mert kisebb energiával (tömegeg) rendelkező állapot valósul meg. Kezdjünk ezután tömeget adni ehhez a tartományhoz. (Ezt a gondolat kísérletet szokás *Susskind-folyamatnak* is hívni a javaslattevő stanfordi fizikus neve után.) A tömeghatárt elérve megtörténik a fekete lyuk-képződés, de a végállapot entrópiája kisebb, mint a kiinduló állapoté. Ez a folyamat sértené az általánosított entrópia növekedésének elvét. A konklúzió az, hogy egy  $V = 4\pi R^3/3$  térfogatú tértartomány teljes entrópiájának maximális entrópiáját a térfogatot elfoglalni képes  $A = 4\pi R^2$  felületű eseményhorizonttal rendelkező fekete lyuknak megfelelő

$$S_{\text{max}} = \frac{A \ln 2}{l_{\text{Planck}}^2}$$

képlettel lehet megbecsülni. A Világegyetem maximális entrópiájára ezzel  $10^{126}$  adódik.

Ehhez képest az ismert anyagformák termikus entrópiája elhanyagolható. Erre  $R. Bousson$  az előzőhöz hasonló alakra hozott becslése világít rá a legtisztábban. Egy  $R$  sugarú tartományban a relativisztikus részecskékkel társított entrópiára és energiára fennállnak az

$$S \approx R^3 T^3, \quad E \approx R^3 T^4$$

arányosságok. Miután az energia nagyságát korlátozza a fekete lyuk kialakulásának esélye:

$$E \leq \text{állandó} \cdot R$$

ezért a relativisztikus részecskék gázának hőmérsékletére adódik a

$$T \leq \text{állandó} \cdot R^{-1/2}$$

nagyságrendi korlát. Itt az állandó tényezők konkrét értéke érdektelen, mivel csak a geometriai méretektől való függés jellegét kívánjuk megérteni. Ezt az entrópiatartalom képletébe helyettesítve látható, hogy

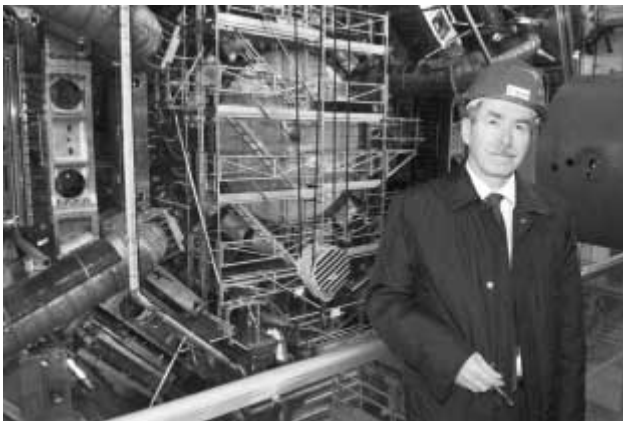
$$S \leq \text{állandó} \cdot R^{3/2} \approx A^{3/4}.$$

Érdekesítő kérdés, mi történik az éppen fekete lyukká alakuló anyag téridő szerkezetével, esetleg mikrolapotainak számával, amelynek eredményeként az entrópia a felülettel lineáris arányossági kapcsolatra vált át.

A fent ismertetett gondolatok abban a megállapításban foglalhatók össze, hogy a *gravitációs stabilitás korlátozza a valamely tértartományban tárolható maximális információtartalmat*. A termodinamikai, statisztikus fizikai és informatikai entrópiafogalmak összekapcsolódásának felismerése vezethette John Wheelert arra a kijelentésre, hogy a fizika tárgya alapvetően a Világegyetem fundamentális információtartalmának a feltárása. Ennek ellenére nem várható, hogy a fizikusok előzönlének a hazai és nemzetközi információtechnológiai pályázatokat. Ugyanis a fenti megállapításoknak a napi haszontermelésnél sokkal izgalmasabb következményei ígérkeznek.

G. 't Hooft (6. kép) 1993-ban radikális általánosítását adta Bekenstein észrevételének, amikor a Világegyetem egészét leírni képes, a jövőben megalkotandó elmélet szerkezetére felállította a *holografikus elv* hipotézist [5], ami azt állítja, hogy a Világegyetem legalapvetőbb független szabadsági fokai kétdimenziós sokaságot alkotnak. Miután óriási tartományról van szó, a határoló felület közelítően síkkal ábrázolható. A tartomány belsejében zajló folyamatok teljes információtartalma ezen a távoli „vetítövászon” elhelyezkedő szabadsági fokokban rejlő információval meghatározott, és a határ viselkedéséből információvesztés nélkül származtatható. 't Hooft párhuzamba állította ezt az elképzelést a háromdimenziós képek kétdimenziós felületen történő tökéletes kódolásával,

6. kép. Gerard 't Hooft CERN-ben, az épülő ATLAS-detektornál



a hologrammal. Ennek alapján a fentebb szereplő entrópiakorlátot *holografikus felső korlátnak* hívják.

Ez a korlát kissé csökkenthető, ha feltesszük, hogy a galaxisokba tömörült anyag termikusan tökéletesen szigetelt, azaz a tágulás a mikrohullámú háttérsugárzás lecsatolódása óta adiabatikus. Az akkori, nagyjából ezerszer kisebb tértartomány sugarával számolva a holografikus entrópiakorlát körülbelül milliószerosa kisebb a fenti értéknél. A holografikus elv hívei nemcsak egyenlőségeként teljesülő felső korlátot, hanem egyenlőséget is remélnék a fenti becslésből kiolvasni. Ez pedig csillagászati „vadászatot” indít a hiányzó entrópia nyomában! Egy 2008 júniusában megjelent cikk *P.H. Frampton* amerikai fizikus tollából azt javasolja, hogy nemcsak szupermasszív fekete lyukak, hanem például a naptömeg ezerszeresét hordozók után is kutatni kellene gravitációs mikrolencse hatásuk felhasználásával. Elegendő számban az ilyen méretű fekete lyukak jelentősen hozzájárulhatnának a jelenlegi entrópiatartalmat a holografikus felső korlátot elválasztó „szakadék” kitöltéséhez.

A történet lezáratlanul vezet a mai részecskefizikai kutatások élvonalába, miután *I. Klebanov* és *L. Susskind*, valamint *B. Thorn* felismerték, hogy a hűrelméletnek van olyan megfogalmazása, amely teljes mértékben megfelel 't Hooft várákozásának. Ugyanakkor mindmáig izgalmas vitakérdést jelent, hogy a fundamentális (Planck-hossznyi méretekből releváns) szabadsági fokok számát általában korlátozza-e a *holografikus elv*. Érdekes megjegyezni, hogy a fekete lyuk felületére koncentrált dinamikai szabadsági fokok feltevésével a fekete lyukak keletkezése és elpárolgása unitér folyamat, azaz a fekete lyukba hulló információ annak felületén tárolódik valamiképpen. Nemrég színpadias gesztussal az információvesztés lehetőségét eredetileg pártoló Hawking vesztesnek nyilvánította magát és átállt a holografikus elvet elfogadók táborába.

Zárásként az abszolút fekete test egykori és a fekete lyuk jelenkori tudománytörténeti szerepe közötti párhuzamra hívnám fel a figyelmet. Az abszolút fekete test sugárzásának univerzális jellege lehetővé tette, hogy Plancknak arra talált kvantumos leírását csakhamar más jelenségkörben fellépő „oscillátorokra” is kiterjesszék, néhány évtized alatt kialakuljon a kvantum-természettudomány. Elképzelhető, hogy hasonló univerzalizálás elméleti keretét épül a tetszőleges objektum által hordozott információ, amely keret jelenlegi megértési szintjét a fekete lyukak entrópiájára alapozott entrópiamaximum tulajdonsága, és az abból kinőtt holografikus elv képviseli.

## Irodalom

1. M. Planck: *Válogatott írások*. (szerk. Szegedi Péter) Typotex, Budapest, 2003, 285 oldal.
2. S. Varró: Einstein's Fluctuation Formula. A Historical Overview. *Fluctuation and Noise Letters* (2006) R11–R46.
3. J.D. Bekenstein: Black Holes and Entropy. *Phys. Rev. D*7(1973) 2333–2346.
4. J.D. Bekenstein: Entropy Bounds and Black Hole Remnants. *Phys. Rev. D*49(1994) 1912–1921.
5. R. Bousso: The Holographic Principle. *Rev. Mod. Phys.* 74 (2002) 825–874.



# A REAKTORTARTÁLY BIZTONSÁGÁNAK ELEMZÉSE

Trampus Péter  
Trampus Mérnökiroda

Az atomerőmű legnagyobb potenciális veszélyforrása a technológiából adódó, az erőmű kezelőire, a polgári lakosságra és a környezetre veszélyt jelentő radioaktív sugárzás. A jelenleg üzemelő atomerőművek tervezése során a biztonság értékelése a „mélységben tagolt védelem” elvének felhasználásával történt. Az egymásra épülő védelmi rétegek meglétén alapuló tervezés és üzemeltetés több egyidejű műszaki meghibásodás és emberi tévedés esetén is védelmet jelent a radioaktív sugárzás kibocsátásával szemben, aminek eredményeként a meghibásodásoknak és az emberi hibáknak csak valamennyi védelmi réteget érintő szélsőséges egybeesése válhat ki súlyos balesetet. Az ilyen esetek valószínűsége igen csekély. A veszély csökkentésének alapja az egyes védelmi rétegek megbízható működésének biztosítása.

Alapvető védelmi réteget jelentenek a *fizikai korlátok*, amelyek egyikét az atomerőmű technológiájának működtetéséhez szükséges nyomástartó berendezések és csővezetékek képezik. Ezek biztosítják azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, ezért szerkezeti integritásuk (épségük) megtartása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt. A kérdés az üzemidő hosszabbítás megjelenésével a korábbiaknál is nagyobb jelentőséget nyer. A nyomástartó berendezések és csővezetékek szerkezeti integritása – biztonsági szerepe mellett – kiemelkedő fontosságú az erőmű gazdaságos üzemeltetése szempontjából is. Amennyiben sérül egy berendezés szerkezeti integritása, a helyreállításához általában csökkenteni kell az erőmű teljesítményét, vagy le kell állítani az erőművet. A termelés kieséséhez hozzáadódnak a javítás vagy a berendezés cseréjének költségei. Jelen cikk célkitűzése, hogy bemutassa a reaktortartály, mint nyomástartó berendezés biztonsága (szerkezeti integritása) elemzésének módszerét.

## Miért a reaktortartály?

A jelenleg üzemelő atomerőművek legelterjedtebb típusa a nyomottvízes (*Pressurized Water Reactor*, továbbiakban *PWR*) atomerőmű. Itt a reaktor magjában (aktív zónájában) felszabaduló hő a reaktort körülvevő hűtőkörök vezetnek el a gőzfejlesztőkbe (primerkör), ahol az elgőzölteteti a szekunder oldalon keringő vizet, és az így keletkező gőz működteti a turbinákat. A típus elnevezése a zárt primerkörben a víz forrásának elkerülését biztosító nagy nyomásra utal, aminek értéke 12–16 MPa között van. A PWR-technológiát alkalmazzák az egykori Szovjetunióban tervezett VVER-típusú atomerőművek is.<sup>1</sup> Magyaror-

szágon négy VVER-440/V-213 típusú reaktorblokk üzemel.<sup>2</sup> A PWR-atomerőművek reaktortartálya magába foglalja az aktív zónát, és közös szerkezeti eleme a nukleáris gőzfejlesztő rendszer hűtőköreinek (VVER-terminológiával: főkeringtető vezetékeinek), valamint a zóna üzemzavari hűtő rendszerének (ZÜHR), azaz a legmagasabb biztonsági funkciót tölti be. Következésképpen – a szerkezeti integritást tekintve – a PWR-ek legkritikusabb berendezése a reaktortartály. Amennyiben a reaktortartály fala olyan mértékben megsérülne, hogy az a hűtőközeg elfolyásához vezetne, és a ZÜHR nem tudná pótolni az elfolyást, akkor hűtés nélkül maradna a reaktor és túlhevülne. Ez súlyosan károsítaná az aktív zónát, ami további fizikai korlátok átlépéséhez, és ellenőrizetlen mennyiségű radioaktív anyag kibocsátásához vezetne. A biztonsági szemponton túlmenően azért is kell kiemelt figyelmet fordítani a reaktortartályra, mert gyakorlatilag nem cserélhető berendezés. Ez egyúttal azt jelenti, hogy a reaktortartály biztonsága (szerkezeti integritásának megőrzése) határozza meg a PWR-atomerőművek műszakilag lehetséges üzemidejét.

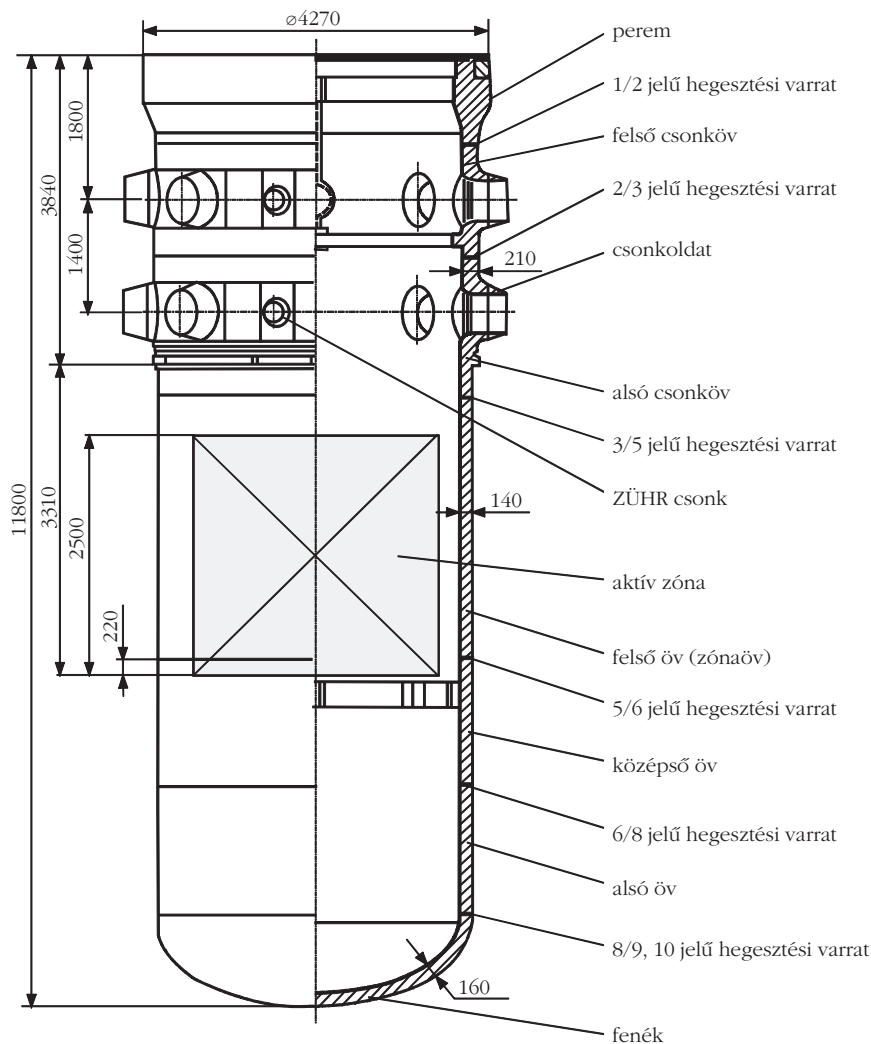
## A VVER-440/V-213 típusú reaktortartály jellemzői

Az 1. ábra a VVER-440/V-213 típusú reaktortartály hosszmetsetét mutatja be, az 1. táblázat a reaktortartály főbb tervezési paramétereit foglalja össze (ilyen tartályok üzemelnek a Paksi Atomerőműben). A tartály hosszabb, karcsúbb és vékonyabb falú a többi (nyugati típusú) PWR-tartályánál, mert befoglaló méreteit a vasúti szállításra való alkalmasságnak és a reaktor tervezett teljesítményének kompromisszuma határozta meg. Ennek eredményeként a tartályfalat érő gyorsneutron-fluxus ( $E > 0,5$  MeV), illetve a fluxusnak a tervezett üzemidőre integrált értéke (gyorsneutron-fluencia) csaknem egy nagyságrenddel nagyobb, mint a nyugati PWR-eknél megszokott fluxus és fluencia értéke. A PWR- és VVER-reaktortartályok tervezésének, gyártásának, üzemeltetésének és ellenőrzésének átfogó összehasonlító értékelését és számos további hivatkozást tartalmaz az [1] tanulmány.

A VVER-440 reaktortartályhoz hat főkeringtető vezeték csatlakozik, amelyek névleges átmérője 500 mm; a beömlő és kiömlő hűtővíz csonkok egymás felett helyezkednek el, az egy szinten lévő csonkok kiosztása aszimmetrikus. A kisnyomású aktív ZÜHR betáplálása közvetlenül a reaktortartályba történik 250 mm névleges átmérőjű csonkokon keresztül, amelyekből kettő-kettő található azonos szinten a hűtővízcsonkokkal. A

<sup>1</sup> VVER = könnyűvíz-hűtésű, könnyűvíz-moderátoros, energiatermelő reaktor.

<sup>2</sup> V-213 = a VVER-440 típusú (440 MW névleges villamos teljesítményű) reaktor második generációja.



1. ábra. VVER-440/V-213 reaktortartály hosszmetsete

gesztési varratok anyaga a durvabb anyagszerkezet és a nagyobb szennyező tartalom következtében ugyanis érzékenyebb a neutronsugárzásra, mint a kovácsolt alapanyag. Az 5/6 jelű varrat magasságában a fluxus értéke a maximális fluxus 66–68%-a.

## A reaktortartály szerkezeti anyagának sugárkárosodása

A szerkezetek terhelés hatására makroszkopikus képlékeny alakváltozást követően (szívósan) vagy anélkül (ridegen) törnek. A szívós törés energiaszükséglete lényegesen nagyobb, mint amennyi energiát a ridegtörés felemészt. A tartály gyártásához felhasznált ferritperlites szövetszerkezetű, térközpontos köbös rácsú acélok törését a hőmérséklet és a próbatest vastagsága együttesen vezérli. Kis hőmérsékleten a repedés ridegen – hasadás útján – terjed, majd a hőmérséklet növekedésével és a próbatest vastagságának csökkenésével a hasadást fokozatosan felváltja a képlékeny elcsúszással megvalósuló repedésterjedés. Létezik egy hőmérséklet-tartomány, amelyben egyidejűleg van jelen mindkét törési mechanizmus; ebben a tartományban a törésszívósság-értékek

nagynyomású aktív ZÜHR három hidegági hurokba, míg a passzív ZÜHR a hidroakkumulátorokból közvetlenül a reaktortartályba táplálja a hűtővizet.

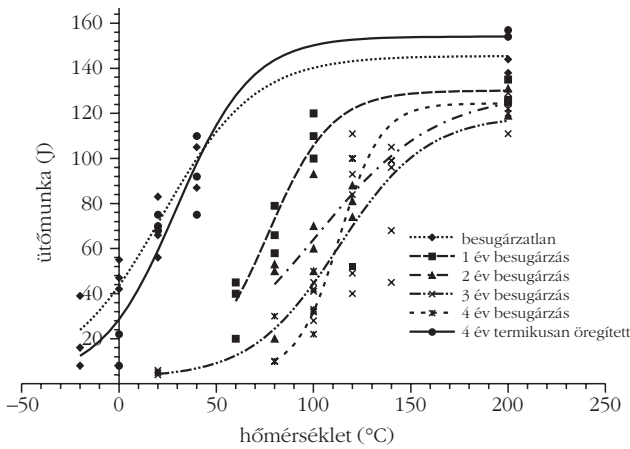
A reaktortartály anyaga króm-molibdén-vanádium ötvözésű nemesíthető acél (jelölése: 15H2MFA). A tartályt kovácsolt és nemesített állapotú gyűrűkből hegesztik össze fedett ív hegesztőeljárással, majd 660–680 °C hőmérséklet-tartományban összesen körülbelül 45 óra időtartamú hőkezelésnek vetik alá, hogy biztosítsák a kívánt mechanikai tulajdonságok elérésében elsődleges szerepet játszó kiválásos keményedést. Az alapanyag szövetszerkezete a hőkezelést követően jellemzően bénit (az ausztenitből diffúzió útján képződő szövetelem), némi martenzit, és igen finom, molibdénben és vanádiumban gazdag, termodinamikailag stabil, speciális karbidok. A reaktortartály belső felületét korrózióálló acélréteggel vonják be (plattírozás), amit hegesztéssel visznek fel rá. A forgácsoló megmunkálást követően a plattírozás névleges vastagsága 9 mm.

A reaktortartály hengeres részén, az aktív zóna alsó szélé fölött körülbelül 220 mm magasságban található egy hegesztési varrat (jelölése: 5/6, lásd az 1. ábrát), amelynek a sugárkárosodása határozza meg a reaktortartály műszakilag lehetséges üzemidejét. A he-

szórása érthetően nagy. Ezt a tartományt a „szívós-rideg átmenet” tartományának nevezik.

A reaktortartály anyagszerkezete a teljes üzemidő alatt a mechanikai és hőigénybevétel szempontjából viszonylag stabil. Ezzel szemben a tartály felső (zóna) övét érő gyorsneutron-sugárzás anyagszerkezet-módosító hatása meghatározó mértékben érvényesül, és

1. táblázat	
VVER-440/V-213 reaktortartály főbb tervezési paramétere	
üzemi nyomás	12,26 MPa
tervezési nyomás	13,70 MPa
próbanyomás (csökkentett)	16,64 MPa
tartályfal üzemi hőmérséklete	265 °C
tartályfal tervezési hőmérséklete	325 °C
tervezett üzemidő	40 év
alapanyag neutronfluencia-terhelése a tervezett üzemidő végén	$2,6 \cdot 10^{20}$ n/cm <sup>2</sup> ( $E > 0,5$ MeV)
5/6 hegesztési varrat neutronfluencia-terhelése a tervezett üzemidő végén	$1,8 \cdot 10^{20}$ n/cm <sup>2</sup> ( $E > 0,5$ MeV)



2. ábra. Átmeneti hőmérséklet görbe eltolódása különböző besugárzási idők után

ez adja a reaktortartály szerkezeti integritása elemzésének különlegességét. Ha egy gyorsneutron rugalmasan ütközik a szerkezeti anyag egy atomjával, és a rácsatomnak átadott energiája meghalad egy küszöbértéket, akkor kimozdítja azt a rácsban elfoglalt helyéről. Ha az ütközési energia elegendően nagy, akkor a kimozdított atom a környezetében hasonló elmozdulások özönét indítja el. A keletkezett rácshibák jelentős része azonban sem elektrokémiailag, sem mechanikailag nem stabil, ezért az ütközést követően szinte azonnal visszajut stabil helyzetébe, vagy rekombinálódik. A sugárzás előidézte ponthibák egy részének diffúzióképessége a besugárzás hőmérsékletén (ez megfelel a reaktor üzemi hőmérsékletének, ami PWR-atomerőművek esetében 250 és 350 °C között van) növekszik. Ez az anyagszerkezet további, rendkívül finom méretű módosulásainak létrejöttét idézi elő. A vázolt folyamat a *sugárkárosodás*. A sugárkárosodás mértékének kialakulásában – egyebek mellett – jelentős szerepet játszanak a szennyező és bizonyos esetekben az ötvöző elemek (pl. réz, foszfor, nikkel). A sugárkárosodás mechanizmusa mind a mai napig intenzív kutatások tárgya.

A sugárkárosodás következtében kialakuló anyagszerkezet megváltoztatja a tartályfal szerkezeti anyagának mechanikai tulajdonságait. A változások közül a legalapvetőbb a szívósság csökkenése és a szívós-rideg átmenetre jellemző hőmérséklet (átmeneti hőmérséklet) növekedése. VVER-reaktorok esetében a  $T_b$  kritikus ridegtörési hőmérséklet növekedéséről ( $\Delta T_b$ ) beszélünk. A szakítóvizsgálattal meghatározható jellemzők közül növekszik a folyáshatár és a szakítószilárdság, csökken a szakadási nyúlás és a kontrakció. Az említett tulajdonságok növekedése, illetve csökkenése a fluencia függvényében monoton és nemlineáris. A mechanikai tulajdonságok ilyenén megváltozását legáltalánosabban neutron-sugárzás okozta *elridegedésnek* nevezik. Amennyiben elfogadjuk azt, hogy a szívósság a dinamikus ütővizsgálat<sup>3</sup> eredményével (az ún. ütőmunkával)

<sup>3</sup> A Charpy-féle ütővizsgálat a vizsgált anyag dinamikus terheléssel szembeni ellenállásáról és hőmérséklet-érzékenységéről tájékoztat. Az eljárás részletei az MSZ EN 10045-ből vehetők ki.

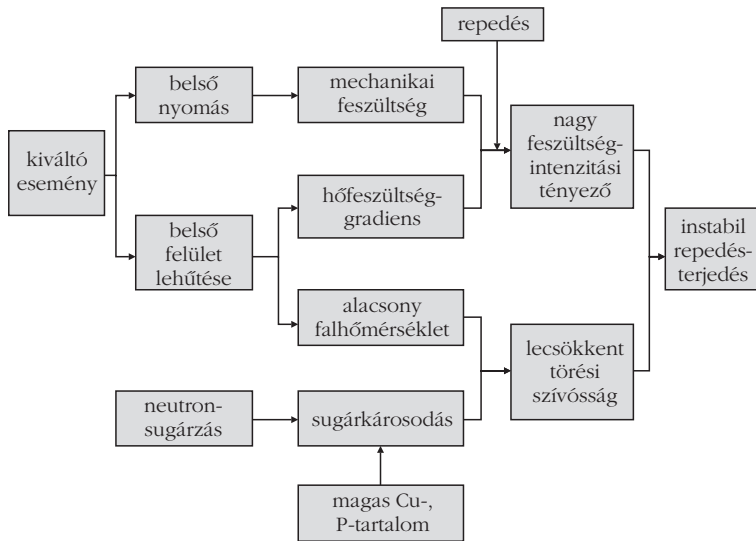
arányos, ami a hagyományos megközelítés alapja, akkor az elridegedés abban nyilvánul meg, hogy az ütőmunka hőmérsékletfüggését leíró görbe (átmeneti hőmérséklet görbe) eltolódik a nagyobb hőmérsékletek irányába, és csökken a felső ütőmunka értéke. Ezekon túlmenően kissé megváltozik a görbe meredeksége is, azaz a görbe „lefekszik”.

A 2. ábra a Paksi Atomerőmű 1. blokk reaktortartály hegesztési varratának anyagából készült felügyeleti próbatestek átmeneti hőmérséklet görbét mutatja kiinduló állapotban és különböző besugárzási idők után. A görbéket tangens hiperbolikus közelítéssel illesztettük az ütővizsgálat eredményeire. A feltüntetett besugárzási időtartamokhoz, az 5/6 jelű hegesztési varrat pozíciójában, rendre a gyorsneutron-fluencia, mint károsodási paraméter következő értékei rendelkezhetők: 1 év =  $0,84 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>; 2 év =  $1,65 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>; 3 év =  $2,46 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>; 4 év =  $3,31 \cdot 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>. Az ábrába berajzoltuk a termikusan öregített (csak az üzemi hőmérséklet hatásának kitett) próbatesteken mért eredményeket is.

Az említett felügyeleti próbatestek arra szolgálnak, hogy segítségükkel a reaktortartály-anyag sugárkárosodásának tényleges mértékét meghatározzák. Ez alapvetően az átmeneti hőmérséklet eltolódásának (VVER-reaktorok esetében a  $\Delta T_b$  értékének) meghatározását jelenti. Alapanyagból, varratfémről és a hegesztési varrat hőhatás övezetéből kimunkált és a reaktortartállyal azonos szövetszerkezetű és tulajdonságú mechanikai és törésmechanikai vizsgálati próbatesteket, valamint neutronfluxus- és hőmérséklet-indikátorokat helyeznek el a tartályokban, amelyeket meghatározott besugárzási idő után megvizsgálunk. A felügyeleti próbatestek a tartályfal és az aktív zóna között helyezkednek el (pontos helyzetüket a reaktor konstrukciója szabja meg), ezért hamarabb kapják meg ugyanazt a besugárzási dózist, mint amit maga a tartályfal megkap. A méréseket ezért neutrontranszport-számítások egészítik ki. A reaktortartály sugárkárosodásáról és annak vizsgálatáról részletesebb információ található a [2] cikkben.

## Mi vezethet a reaktortartály töréséhez?

A reaktortartály szerkezeti integritására nézve kritikus igénybevétel az átmeneti üzemi állapotokban, valamint a ZÜHR működése esetében fordulhat elő. A reaktor felfűtési és lehűtési műveleteit úgy kell elvégezni, hogy az összetartozó nyomás- és hőmérsékletértékek mindig a megengedett tartományon belül maradjanak. A megengedett tartomány egyik határát a ridegtörés elkerülését biztosító, és a sugárkárosodással arányosan változó helyzetű nyomás-hőmérséklet görbe jelöli ki. A ZÜHR működését hűtőközeg vesztéssel járó üzemzavar (*Loss-of-Coolant Accident, LOCA*), illetve arra utaló jelzés indítja el. Ekkor alacsony hőmérsékletű (20–50 °C) hűtővizet táplálnak be a reaktorba, ami érintkezésbe lép a tartályfal belső felületével és hőt von el onnan. Ez a tartályfal felületén és felületkö-



3. ábra. A reaktortartály esetleges ridegtöréséhez vezető tényezők PTS esetén

zeli rétegében hőfeszültségeket hoz létre. A kialakuló húzófeszültségek hatására az ebben a tartományban esetlegesen elhelyezkedő felületi, vagy a felület alatt beágyazódott repedés frontja mentén nagy lesz a feszültség értéke. A repedés körüli feszültség leírására a törésmechanikában leginkább a  $K_I$  feszültségintenzitási tényező használata terjedt el. Amennyiben a tartály szerkezeti anyagának törési szívóssága a sugárkárosodás eredményeként lecsökkent, és az átmeneti hőmérséklete megnőtt, akkor fennáll annak a lehetősége, hogy a folytonossági hiány (repedés) instabil terjedésnek induljon.

A tartályintegritás szempontjából legkíméletlenebb LOCA a nyomásalatti hősokk (*Pressurized Thermal Shock, PTS*). Ennek az üzemzavarnak a sajátossága az, hogy a ZÜHR betáplálással – azaz a tartályfal gyors lehűtésével – egyidejűleg a reaktortartályban uralkodó nyomás növekszik, és a növekedés meghaladhatja az üzemi nyomás értékét is. PTS esetében a hőfeszültség és a belső nyomásból adódó feszültség szuperpozíciója eredményeként kialakuló feszültség meghaladja a közönséges LOCA esetében ébredő feszültséget. A 3. ábra egy PTS-eseményre mutatja be a reaktortartály esetleges ridegtöréséhez vezető tényezőket és azok egymással való kapcsolatát.

## A biztonság elemzése

A reaktortartályt alapvetően úgy tervezik, gyártják és üzemeltetik, hogy üzemideje alatt igen kis valószínűséggel hibásodjon meg. A reaktortartály katasztrófális következményekkel járó meghibásodásának gyakoriságára általában  $10^{-7}$ /év értéket fogadnak el. Az igen kis valószínűségű meghibásodás elsődleges feltétele, hogy a tartályfal szerkezeti anyagának szívóssága ne csökkenjen le olyan mértékben, hogy egy meglévő repedés a terhelés hatására instabil terjedésnek induljon, továbbá hogy az anyag ne kerüljön az eredetileg szívós állapotából rideg állapotba. Így ki lehet akná-

ni a tartályfal anyagának azt a tulajdonságát, hogy a szívós törés létrejöttének energiaszükséglete lényegesen nagyobb, mint amennyi energiát a tartályfal esetleges ridegtörése felemész. Mindezekből látható, hogy a reaktortartály szerkezeti épségének elemzése során a ridegtöréssel szembeni ellenállásra kell koncentrálni. A biztonság (szerkezeti integritás) elemzésének összefüggéseit a 4. ábra mutatja.

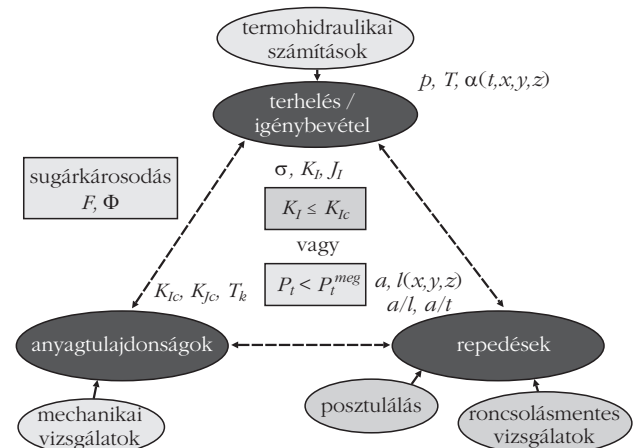
A reaktortartály ridegtöréssel szembeni ellenállását kétféle megközelítésben lehet vizsgálni. A *globális* megközelítés kontinuummechanikai modelleken nyugszik, és általában a lineárisan rugalmas, vagy esetenként a rugalmas-képlékeny törésmechanika összefüggéseit alkalmazza. A törésmechanika azt a kérdést vizsgálja, hogy legfeljebb mekkora feszültséggel terhelhető egy repedést tartalmazó berendezés, hogy a

benne lévő repedés ne induljon instabil terjedésnek. A reaktortartály biztonságát többnyire *determinisztikus* módon elemzik. Ennek lényege, hogy különböző tranziensek előidézte terheket adnak feltételezett repedésekre, majd ezekből meghatározzák a  $K_I$  feszültségintenzitási tényező értékeit a repedésfront kitüntetett pontjaiban. Meghatározzák továbbá a szerkezeti anyag állapotát, azaz a sugárkárosodás mértékét jellemző átmeneti hőmérséklet eltolódást.

A determinisztikus megközelítés szerint egy reaktortartály akkor biztonságos, ha az alábbi egyenlet teljesül valamennyi normál üzemi, normál üzemtől eltérő és üzemzavari állapotra a reaktor teljes üzemideje alatt:

$$n_K K_I(a_{fett}) \leq K_{Ic}(T), \quad (1)$$

4. ábra. A reaktortartály szerkezeti integritása elemzésének sémája. Jelölések:  $p$  – nyomás (MPa),  $T$  – hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha$  – lineáris hőtágulás tényezője ( $1/\text{K}$ ),  $t$  – idő (s),  $x, y, z$  – helykoordináták (m),  $\sigma$  – feszültség (MPa),  $K_I$  – feszültségintenzitási tényező ( $\text{MPa m}^{1/2}$ ),  $J_I$  – J-integrál ( $\text{J/m}^2$ ),  $K_{Ic}$  – törési szívósság ( $\text{MPa m}^{1/2}$ ),  $K_{Ic}$  – J-integrálból számolt törési szívósság ( $\text{MPa m}^{1/2}$ ),  $T_k$  – kritikus ridegtörési hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $F$  – gyorsneutron-fluencia ( $\text{n/m}^2$ ),  $\Phi$  – gyorsneutron-fluxus ( $\text{n/m}^2\text{s}$ ),  $P_t$  – törési valószínűség,  $P_t^{meg}$  – megengedett törési valószínűség,  $a$  – repedésmélység (m),  $l$  – repedéshossz (m),  $t$  – falvastagság (m).





ahol  $n_K$  az üzemállapottól függő biztonsági tényező,  $K_I$  a feszültségintenzitási tényező,  $a_{felt}$  a feltételezett repedés falvastagság irányú mérete és  $K_{Ic}(T)$  a tartály anyagának aktuális törési szívóssága.

A megengedett statikus törési szívósság egy hőmérséklettől függő görbe (referenciagörbe), amit nagyszámú, különböző méretű, besugározatlan törésmechanikai próbatest vizsgálati eredményeire szemmel illesztettek, mint a pontok alsó burkológörbéjét. Az 5. ábra a VVER-440 reaktortartály-acélra mutatja be az orosz, cseh, szlovák, finn és magyar eredményeket (kb. 1200 mérési pontot) és a használatos alapanyagokra és hegesztési varratokra egyaránt érvényes referenciagörbét [3]. Annak érdekében, hogy a különböző acélok referenciagörbéit egy koordináta-rendszerben lehessen ábrázolni, a vízszintes tengelyen a hőmérséklet-skálát indexelik a referencia-hőmérséklet (az átmeneti hőmérséklet) kiinduló értékével. Az 5. ábrába berajzolt referenciagörbe egyenlete a következő:

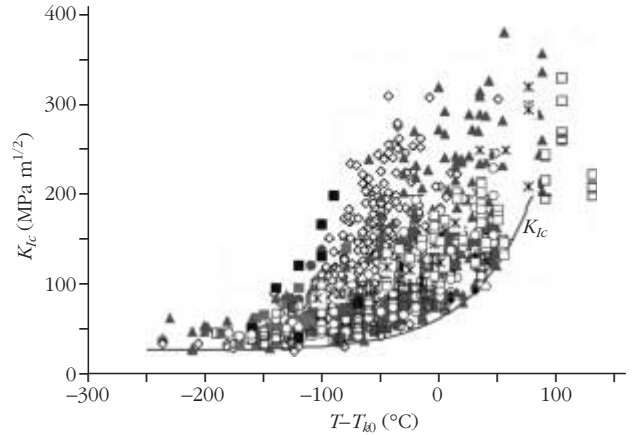
$$K_{Ic} = \min\left[26 + 36 e^{0,02(T - T_{k0})}; 200 \text{ MPa m}^{1/2}\right], \quad (2)$$

ahol  $T_{k0}$  a kritikus ridegtörési hőmérséklet kiinduló értéke.

A sugárkárosodás figyelembe vétele a szerkezeti épség elemzése során azon a hipotézisen alapul, hogy a referenciagörbe besugárzás hatására történő eltolódása megegyezik a dinamikus ütővizsgálattal felvett átmeneti hőmérséklet görbe eltolódásával. A hipotézis elterjedéséhez jelentős mértékben hozzájárult az a tény, hogy a reaktortartály-felügyeleti programok esetében a szükséges méretű törésmechanikai próbatestek besugárzása akadályokba ütközik. A hipotézis alkalmazása viszont azt jelenti, hogy a sugárkárosodás ellenőrzéséhez használatos referenciagörbék helyzete nem „valódi” törésszívósság-értékeken nyugszik.

A reaktortartály ridegtöréssel szembeni biztonságát *valószínűségi* módszerrel is értékelhetik. Ekkor a repedés- és anyagtulajdonság-paraméterek eloszlásfüggvényeit alkalmazzák (falvastagság irányban mért repedéshossz eloszlása, repedés térfogategységenkénti előfordulásának gyakorisága, átmeneti hőmérséklet eloszlás) és *Monte Carlo*-számítással határozzák meg a meghibásodás feltételezett valószínűségét egy kiválasztott tranziensre. Ezt megszorozzák a tranziens bekövetkezésének a valószínűségével, majd ezt elvégezve a többi tranziensre, az eredményeket összegzik. Ennek a valószínűségnek kell egy korlát alatt maradnia. Valószínűségi elven alapszik az amerikai nukleáris biztonsági szabályzat PTS-elemzése; a törés valószínűségének  $5 \cdot 10^{-6}$  érték alatt kell maradnia.

Az alkalmazott hipotézis hibája az, hogy a referenciagörbék felvételekor nem vették figyelembe a próbatestek mérethatását a törési szívósságra, továbbá magában hordozza az ütőmunka és a törési szívósság közötti elvi eltérésekből adódó bizonytalanságot, ami abból ered, hogy míg az ütőmunka az anyag dinamikus, addig a törési szívósság a statikus viselkedést jellemzi. Az ellentmondás feloldásának módja a besu-



5. ábra. VVER-440 reaktortartály-anyagok statikus törési szívósságának hőmérsékletfüggése különböző méretű (10–150 mm) törésmechanikai próbatestekre [3]

gázott reaktortartály-anyagok törési szívósságának közvetlen mérése. A reaktortartály-felügyeleti programok azonban kisméretű próbatesteket tartalmaznak, amelyek esetében a repedés éle közelében elkerülhetetlen a képlékeny alakváltozás. Ezekből a próbatestekből így nem határozható meg közvetlenül a lineárisan rugalmas törési szívósság, ezért kézenfekvő a  $K_{Ic}$  helyett a  $J$ -integrál kritikus értékéből levezethető  $K_{Ic}$  paraméter meghatározása. A  $J$ -integrál a repedés körüli helyi alakváltozás-feszültség mező leírására alkalmas matematikai kifejezés, ami figyelembe veszi a helyi képlékeny alakváltozást is.

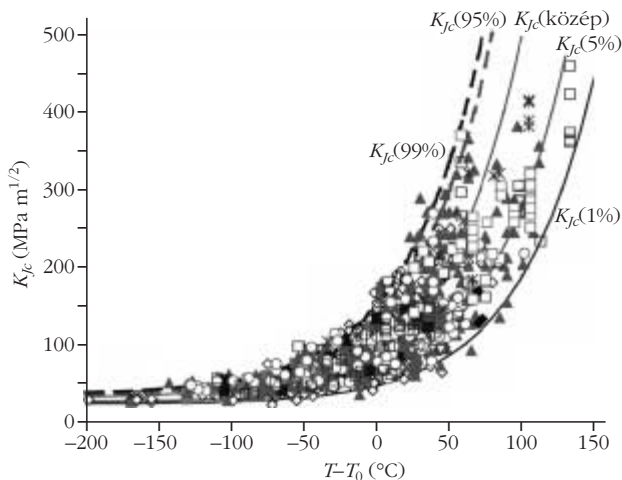
A törési szívósság közvetlen meghatározásának legáltalánosabban használatos módszere a „mestergörbe” módszer [4]. Ez a módszer úgy veszi figyelembe a próbatest méretének statisztikus hatását a  $K_{Ic}$ -re a szívós-rideg átmenet tartományában, hogy a „leggyengébb láncszem” elméletet alkalmazza a törésszívósság-értékek háromparaméteres Weibull-eloszlására. A törésszívósság-görbe (mestergörbe) meghatározása a különböző törési valószínűségekre statisztikai módszerekkel történik. A valamennyi ferrit-perlites acélra érvényes mestergörbe általános egyenlete a következő:

$$K_{Ic} = 20 + \left[11 + 77 e^{0,019(T - T_0)}\right]^4 \sqrt[4]{\frac{25}{B} \sqrt{-\ln(1 - P_i)}}, \quad (3)$$

ahol  $T$  a vizsgálati hőmérséklet,  $T_0$  a referencia-hőmérséklet (25 mm próbatestvastagság esetében 100 MPa m<sup>1/2</sup> közepes törésszívósság-értékhez tartozó hőmérséklet),  $B$  a próbatest vastagsága és  $P_i$  a törés bekövetkezésének valószínűsége.

A mestergörbét ugyan elsősorban a nyugati PWR-ek acéljaira fejlesztették ki, de az a VVER-440 reaktorok szerkezeti anyagaira is alkalmazható, amit a 6. ábra bizonyít (jelöléseket lásd az előző bekezdésben) [3]. Az ábrán látható, hogy a mérési pontok gyakorlatilag 1% és 99% törési valószínűség közé esnek.

Ígéretessége és egyszerűsége ellenére a mestergörbe módszer fizikai megalapozása még további kutatómunkát igényel. A Weibull-eloszlás megbízhatóan



6. ábra. Mestergörbe illesztése VVER-440 reaktor szerkezeti anyagokra [3]

jellemzi a hasadásos törés statisztikus természetét homogén szövetszerkezet esetében valamennyi kiválasztott keményített acélra, de alkalmazhatósága nem bizonyított a heterogén szövetszerkezetű acélokra. További kutatásokat igényel annak bizonyítása is, hogy a törési szívósság hőmérsékletfüggését leíró görbe közös valamennyi ferrites acélra, különös tekintettel azok besugárzott állapotára, és hogy a törésszívósság-értékek szórása független a szövetszerkezettől, azaz a hasadást kiváltó „gyenge láncszemek” eloszlásától. Ugyancsak nyitott a módszer alkalmazhatóságának kérdése a  $-50\text{ °C} \leq T - T_0 \leq +50\text{ °C}$  hőmérséklet-tartományon kívül. Mindezek ellenére a mestergörbe módszer alkalmazása egyre nagyobb teret nyer a reaktortartályok biztonságának megítélésében, valamint a műszakilag lehetséges üzemidő meghatározásában [5].

Elsősorban a globális megközelítés korlátainak kiküszöbölésére fejlesztették ki a *lokális* módszereket. A javasolt lokális modellek többsége azon alapszik, hogy a törési feszültségnek a repedésfront előtt egy kritikus távolságon (vagy térfogatban) kell túllépnie a szilárdságot ahhoz (kritikus feszültség), hogy egy ha-

sadást előidéző anyagszerkezeti képződményt találjon, és feltételezik, hogy ez a távolság statisztikus természetű. E módszerek alkalmazásának előfeltétele igazolt mikro-mechanikai modellek rendelkezésre állása és a repedés éle környezetében uralkodó feszültség-, illetve alakváltozás-mező pontos leírása. A lokális módszerek nem alternatívái a globális módszereknek, sokkal inkább azok kiegészítőivé fognak válni. A lokális megközelítés összefoglalását és további hivatkozásokat tartalmaz a [6] tanulmány.

## Zárszó

A cikkben áttekintettük a reaktortartály biztonságának (szerkezeti épségének) törésmechanikai elemzési módszerét, annak különböző szempontjait. A módszer jelentős fejlődésen ment át az elmúlt évtizedek során és a fejlődés valószínűleg legforradalmibb szakasza még nem zárult le. A írásban nem foglalkoztunk vele, csak utaltunk rá a 4. ábra jobb alsó sarkában, hogy a reaktortartályt időszakonként roncsolásmentes vizsgálatnak vetik alá. A roncsolásmentes vizsgálatokkal azt igazolják, hogy a tartály nem tartalmaz a törésmechanikai elemzéshez feltételezett repedésnél nagyobb méretű tényleges folytonossági hiányt.

## Irodalom

1. Davies, L. M.: A comparison of Western and Eastern nuclear reactor pressure vessel steels. *Int. Journal Pressure Vessel and Piping*, 76 (1999) 163–208.
2. Trampus P.: Reaktortartály acél sugárkárosodása és a károsodás csökkentése. *Anyagvizsgálók Lapja*, 14 (2004) 88–95.
3. Brumovsky, M.: Check of Master Curve application to embrittled RPVs of WWER type reactors. *Int. Journal Pressure Vessel and Piping*, 79 (2002) 715–721.
4. Wallin, K. et al.: Statistical model for carbide induced brittle fracture in steel. *Metal Science*, 18 (1984) 13–16.
5. Guidelines for Application of the Master Curve Approach to Reactor Pressure Vessel Integrity in Nuclear Power Plants. *Technical Report Series No. 429*. IAEA, Vienna, March 2005.
6. Wiesner, C. S.: *The 'Local Approach' to Cleavage Fracture – Concepts and Applications*. Abington Publishing, Cambridge, 1996.

# GEM, AVAGY ÚJ TREND A RÉSZECSEKEDETEKTOROK VILÁGÁBAN

Barnaföldi Gergely Gábor, CNR Kent State University, Kent, USA; MTA KFKI RMKI  
Varga Dezső, ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

## A részecskedetektálás és azonosítás alapjai

A részecsekefizika és a nagyenergiás magfizika az anyag alapvető építőköveit, ezek lehetséges állapotait és a köztük zajló kölcsönhatásokat vizsgálja. A hétköznapi szempontból pontszerű „építőkövek” (részecskék) méretei és tömegei több tucat nagyságrend-

del kisebbek a kézzel fogható méreteknél (a proton tömege  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  kg, az elektron töltése  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C), sebességük viszont sok nagyságrenddel nagyobb lehet a környezetünkben érzékelhető mozgásénál, gyakran közel fénysebesség ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Óhatatlanul felmerül bennünk a kérdés: vajon hogyan lehet ezeket a mennyiségeket megmérni? A

részecskefizika közel száz éves történetének jelentős része éppen ezekről, az apró részecskék mérésének módszereiről szól.

A részecskék detektálásának elvi alapja mindig a mikroszkopikus részecskék és a makroszkopikus anyag kölcsönhatása: az anyagon keresztülhaladó részecske az útjába kerülő atomokkal ütközik, energiájának egy kis részét – elsősorban elektromágneses kölcsönhatás útján – átadja nekik. Ha az ilyen módon gerjesztett atomokat, vagy az áthaladáskor az atomi pályákról kiszakított elektronokat detektáljuk, a részecske pályája mérhetővé válik [1, 2].

A nagyon gyors, közel fénysebességgel haladó részecskék a relativitáselmélet jóslata szerint a tömegüktől függetlenül hatnak kölcsön az anyaggal,<sup>1</sup> ezért általában a detektálásnál nehezebb feladat azt meghatározni, hogy pontosan milyen fajta is volt az eredeti részecske. A modern detektorrendszerekben az azonosítást (Particle Identification, PID) gyakran úgy érik el, hogy egy adott részecskét egymás után több berendezés is megmér, különböző speciális feladatokkal (a pályát pontosan meghatározni, vagy a sebességet nagyon pontosan megmérni), az összetett információ pedig már elég az egyértelmű azonosításhoz. Sok esetben csak statisztikai eredményt kapunk, azaz sok részecske méréséből megtudjuk, hogy az egyes részecskefajták aránya mekkora volt.

## Elektronsokszorozás lavinaeffektussal

A modern rendszerekben a részecskék pályájának meghatározására legelterjedtebb módszer az atomokról leszakított elektronok, azaz az ionizáció mérése. Ennek speciális esete, amikor az ionizáció gázban történik, aminek előnye, hogy az elektronok megfelelően tiszta gázban elektromos térrel messzire (méterekre) eljuttathatók, tehát nagy térfogattól is könnyen összegyűjthetők. A nagyenergiás részecskék áthaladásukkor centiméterenként néhány száz elektront keltenek, ami nagyon kevés ahhoz, hogy az elektromos feldolgozórendszer háttérzajától megkülönböztethető legyen. Ezt a problémát először a *H. Geiger* és *E. Rutherford* által 1908-ban alkotott, majd 1928-ban *W. Müller* által tökéletesített Geiger–Müller-cső oldotta meg. A berendezésben a középső, pozitív feszültségű anódszál felé vándorolnak az elektronok. Az ötlet lényege, hogy a szál közelében kialakuló nagy elektromos térerősségben az elektronok annyira felgyorsulnak, hogy újabb ionizációra lesznek képesek. Az így keltett elektronok ismét gyorsulnak, újra ionizálnak – kialakul az elektronlavina, amely már jól mérhető töltésmennyiséget jelent, akár a klasszikusan ismert kattanást kelteve egy hangszóróban [2].

A modern detektorokban a GM-csőhöz képest kisebb feszültséget és vékonyabb, 20–30 mikrométeres szálakat használnak, ami gyorsabb működést és pon-

<sup>1</sup> Feltéve, hogy energiájuk sokkal nagyobb, mint nyugalmi tömegük szorozva a fénysebesség-négyzettel.



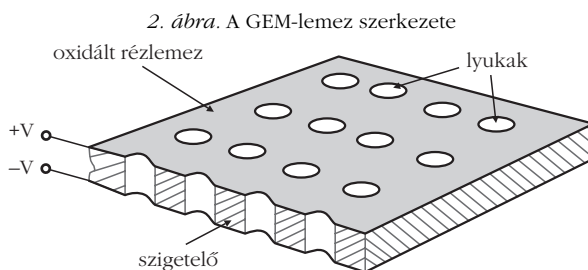
1. ábra. Sokszálas (TPC) kamra a CERN LEP-ben

tosabb ionizációmérést tesz lehetővé. Ezeket az úgynevezett sokszálas proporcionális kamrákat elsősorban részecskepályák mérésére használják. Az olykor több (tíz) méteres detektorokban sok párhuzamosan kifeszített vékony drótszálból álló bonyolult hálórendszer adja az elektronok begyűjtéséhez szükséges homogén elektromos teret (1. ábra). Az első ilyen kamrát *G. Charpak* készítette 1968-ban (majd 1992-ben Nobel-díjat kapott érte).

A sokszálas proporcionális kamrák készítése és beüzemelése igen aprólékos munka, amit leginkább talán a zongorahangoláshoz hasonlíthatunk. Gyakran több tízezer szál tartalmaznak, amelyeket egyenletesen megfeszítve forrasztanak egy masszív kerethez. A mérés során figyelembe kell venni a tartókeretek deformációit, különben a keletkező elektromos tér nem lesz elég egyenletes. Ezek megtervezése drága technológiát és komoly mérnöki munkát igényel.

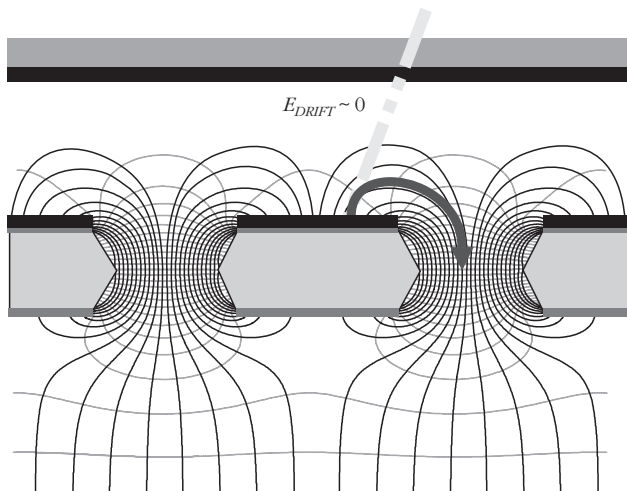
## A gázelektron-sokszorozó – GEM-detektor

A '90 évek közepén *F. Sauli* által felfedezett gázelektron-sokszorozó (GEM – Gas-Electron Multiplier) alapvetően új ötletet jelentett a korábban használt sokszálas kamrák technológiájával szemben. Az alapötlet szerint a kis tartományra kiterjedő, erős elektromos tér nemcsak párhuzamosan kifeszített szálakkal valósítható meg.



2. ábra. A GEM-lemez szerkezete



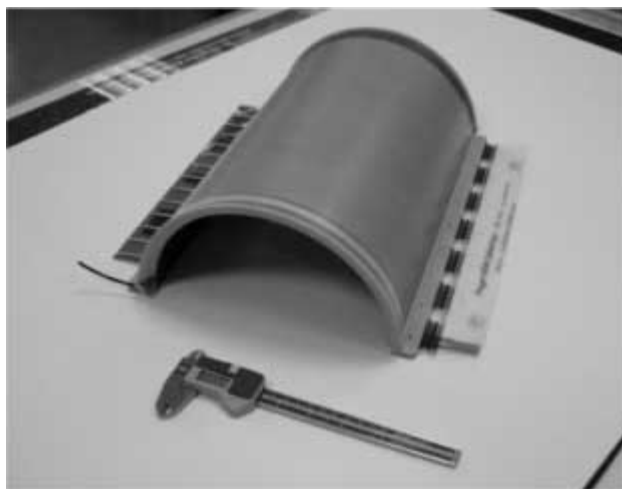
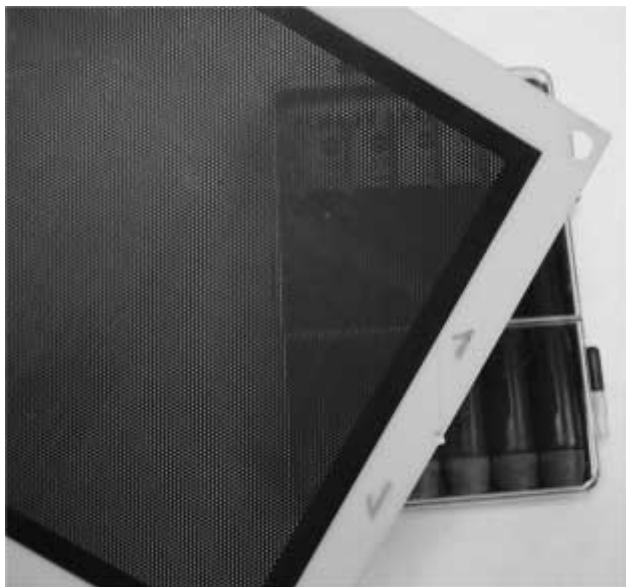


3. ábra. Ionizáló részecske a GEM elektromos térében

A GEM külsőre nem más, mint egy szitaszerűen átlyuggatott vékony, 0,06 mm vastag kondenzátorlemez (2. ábra). A lyukak átmérője 0,04 mm körüli, elrendezésük hatszöges rácsszerkezetet követ. A kondenzátorlemezek közé kapcsolt feszültség hatására a lyukakban nagy elektromos térerősség jön létre. A mérni kívánt részecske által keltett elektronok a GEM lemezpár felé haladnak egy gyenge külső elektromos térben, majd – az elektromos tér szerkezete miatt – fókuszáltnak a legközelebbi lyuk közepébe vándorolnak (3. ábra). A lyuk belsejében akkora az elektromos térerősség, hogy kialakul a lavinaeffektus, tehát a lemezpár alján a fentről érkező elektronok sokszorosára távozik [3].

A GEM mechanikai tulajdonságai sokkal jobbak a sokszálas kamráknál, sokkal kisebb beállítási pontosságot követelnek meg, illetve a szálak húzóereje miatti nagy tartókeretekre sincs szükség. Ráadásul hajlékony lemezként könnyebben formálható belőle majdnem tetszőleges alakú detektor (4. ábra). Nap-

5. ábra. RETGEM-lemez



4. ábra. Hengeres GEM az NA61-detektorból [4]

jainkban a CERN-ben a COMPASS-, a TOTEM-, az LHCb-, valamint a jövőben az NA61- és az ALICE-kísérletekben alkalmaznak GEM alapú detektorrendszereket [4, 5].

A GEM-detektorok szinte szó szerint új dimenziót nyitottak meg az elektronsokszorozáson alapuló detektortechnikában, hiszen az alapvetően síklapokból felépülő sokszálas kamrák helyett korábban elképzelhetetlen geometriájú, görbült felületű detektorok is készíthetők. Elképzeléseinknek szinte csak a GEM előállításának borsos ára szabhat határt.

A GEM-ek és a proporcionális kamrák közötti elvi különbség egy technikai szempontból fontos különbségben nyilvánul meg: amíg egy normálisan üzemeltetett proporcionális kamra szinte sosem üt át, a GEM-ekben ez gyakran előfordul. Ilyenkor a véletlenszerűen valamelyik lyukban keletkező szikra kisüti a kondenzátor teljes töltését, ami esetlegesen veszedelmes lehet magára a GEM-re, illetve a kiolvasó elektronikára.

## Szegény ember vastag GEM-mel főz

A GEM-lemez tulajdonságait vizsgálva hamar ráébredtek a kutatók, hogy létezik egy szinte „háziilag”, hagyományos mechanikai eszközökkel is elkészíthető változat is, a GEM egyszerű felnagyítása: a vastag (Thick) GEM (TGEM). Ez tulajdonképpen egy 0,3–1 mm vastagságú nyomtatott áramköri lemez (5. ábra), mindkét oldalán rézfóliával, amelybe – hasonlóan az „igazi” GEM szerkezetéhez – 0,2–0,5 mm-es lyukakat fúrtak. A nagyobb méret miatt az előállítás sokkal olcsóbban, hagyományos fúrós technikával történik. Használatukkor nagyobb feszültséget kapcsolunk a lemezre, mint a normál GEM-ekre (kb. 500 V helyett mintegy 1000 V-ot).

Az így kapott vastag TGEM-lemezekkel strapabíró és olcsó detektorelemeket lehet előállítani, amelyeket V. Peskov részletesen vizsgált a CERN-ben [5]. Ha a kondenzátorlemez elektródái nagy felületi ellenállású anyagból készülnek, a szikrák ereje jelentősen – akár



1. táblázat Részecske-gázdetektorok összehasonlítása			
	sokszálas kamra	GEM	vastag vagy TGEM
erősítés	kiváló	kiváló	kiváló
jel/zaj viszony	kiváló	kiváló	kiváló
mechanikai stabilitás	érzékeny, keretfüggő	stabil, hajlítható	nagyon stabil, merev
ár	drága	nagyon drága	nagyon olcsó
helyfelbontás	közepes	kiváló	közepes
egyéb		átütésveszély	átütésveszély

tizedére – csökkenthető. Az ilyen RETGEM (Resistive-Electrode Thick GEM) technikával készült lemezek felfedezése újabb lendületet adott az olcsó és egyszerű jövőbeni detektorok építésének.

## GEM-alkalmazások

A (T)GEM–RETGEM alapú detektorok nagyszerű tulajdonságaiknak köszönhetően (1. táblázat) jól használhatók részecskepályák detektálására és részecskeazonosításra. Az egyszerű szerkezet, üzemeltetés és olcsó előállítás miatt a részecskefizikai detektorok mellett egyre több hétköznapi alkalmazási lehetőség jelent meg.

Miután a GEM-detektorok alapvetően érzékenyek a töltőgáz összetételére és tisztaságára, a karakterisztikák ismeretében lehetőség nyílik gázok, vagy gázke-

verékek ennek alapján történő azonosítására. Érdekes alkalmazási terület lehet egy olyan detektor, amely képes felismerni a veszélyes gázokat vagy a szmogot.

Az egyszerűbb RETGEM alapú detektorok viszont kevésbé érzékenyek a használt gáz minőségére vagy tisztaságára. A gáz szennyezettségét nagyon jól tolerálják. Így gáz-levegő keveréket, vagy extrém esetben akár levegőt (!) is használhatunk töltőgázként.

Ultraibolya fényre reagáló cézium-jodiddal bevonva a TGEM-lemezeket nagy érzékenységgű UV-detektort lehet készíteni. Ezen elv alapján cézium-jodid és RETGEM kombinálásával sikerült kifejleszteni egy lángdetektort, amely több nagyságrenddel érzékenyebb, mint a kereskedelemben kapható lángdetektorok. Egy ilyen detektor egy kivilágított helyiségben, 30 méteres körzetben a gyufalángot vagy az égő cigarettát mintegy ezerszer biztosabban detektálta.

Dozimetriai alkalmazásként az alfa-részecskék beütésének észlelésére alkalmas detektort is építettek, amelyben dupla RETGEM-réteget helyeztek el.

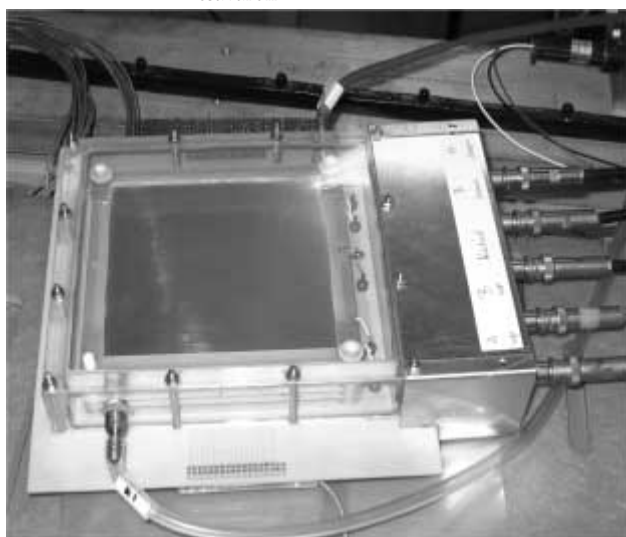
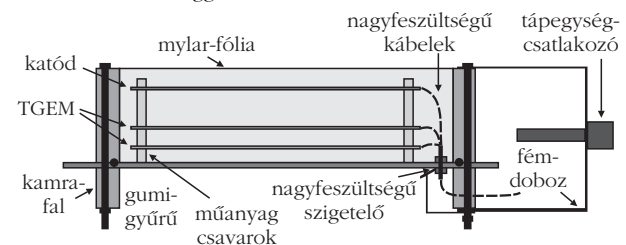
## RETGEM-labor az RMKI-ban

Az MTA KFKI RMKI ALICE-csoportja 2005-ben létrehozott egy TGEM–RETGEM-laboratóriumot. E laboratóriumnak a célja, hogy az CERN LHC ALICE-kísérletében működő egyik alegységet, a HMPID-detektort továbbfejlessze [6, 7]. A HMPID (High Momentum Particle Identification Detector) feladata, hogy a nagy impulzusú részecskéket azonosítsa 3–5 GeV/c impulzusig. A továbbfejlesztett VHMPID-detektorban a fenti impulzustartomány kiterjeszhető lesz 10–15 GeV/c-ig.

Az TGEM–RETGEM-laborban folyó munka célja egy olyan, nagyon gyors részecske-detektáló rendszer létrehozása, amely nagy biztonsággal jelzi egy ritka esemény megtörténtét, nevezetesen egy gyors (nagy impulzusú) részecske áthaladását. Az ilyen jelzőrendszer *triggernek* nevezik. Jelen berendezésnek több tízezer részecske közül kell kiválasztania az egyetlen igazán nagy energiájút. A tervezett VHMPID-detektoron áthaladó részecskék egy több rétegű RETGEM-lemezekből álló rendszeren mennek majd át az ALICE-detektor mágneses terében. A rendszer egyik rétegét modellezző, két TGEM-lemezt tartalmazó kamra látható a 6. ábrán. A lemezeken mért beütési helyek alapján visszaszámolható a részecske pályája. Kihívást jelent, hogy a kapott elektromos impulzusok alapján – az ALICE-detektor fő triggerjelének tötrésze alatt – néhány  $\mu\text{s}$  idő van a pálya meghatározásához és a döntések meghozatalához, amelyben a gyors logikai áramköröknek nagy szerep jut.

A VHMPID trigger prototípusát először 2006 novemberében teszteltük a CERN-ben direkt részecskenyalábokkal. A kamrát számítógépes szimulációk alapján tökéletesítettük, és 2008 májusában újabb nyalábtesztnek vetjük alá. A sikeres tesztek után kezdődhet el a trigger és a VHMPID-detektor szoftveres és hardveres összehangolása, valamint a valós méretű modul előállítás.

6. ábra. Trigger testkamra a VHMPID-kísérlethez



## Zárszó

Az Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben jelenleg folyó detektorépítés méltó folytatása a korábbi, évtizedes kísérleti fejlesztéseknek, mint például a CERN SPS gyorsító NA49-kísérletének Budapest-fala, vagy a CERN LHC CMS-detektorának építésében való aktív részvétel. Csoportunk a VHMPID tesztmérési mellett részt vesz a ALICE HMPID-detektor beüzemelésében, valamint a mérések kiértékelésében is. Kutatásainkat az OTKA NK62044, IN71374 és PD73596 pályázata támogatja. Kutatócsoportunk köszönetét

szívesen kifejezni *Surányi Gergely*nek (BME Nukleáris Technikai Intézete) és *Pálfalvi József*nek (MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézete) a tesztmérések során nyújtott segítségével.

## Irodalom

1. <http://pdg.lbl.gov>
2. <http://www.rmki.kfki.hu/reszecskefiz>
3. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/27921>
4. <http://na61.web.cern.ch>
5. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29894>
6. <http://www.kfki.hu/~alice/>
7. <http://aliceinfo.cern.ch/>

# A TALAJ ÉS AZ ÚTBURKOLATOK RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSA

Sós Katalin

Szegedi Tudományegyetem,  
JGYPK, Fizika Tanszék

Napjainkban egyre többen és egyre többet foglalkoznak a környezetvédelem problémáival, ezen belül lakókörnyezetünk állapotával. Világátlagot tekintve a radioaktív háttérsugárzás effektív dózisének 60%-a az épületektől származik, ezért mindinkább előtérbe kerül a lakóépületekben és a munkahelyeken mérhető radioaktív sugárzás vizsgálata. Viszonylag keveset foglalkoznak azonban a különböző útburkolatoktól származó radioaktív sugárzással és a burkolatok sugárzásárnyékoló hatásával. Ez azzal is magyarázható, hogy az innen származó radioaktív sugárzás csak igen rövid ideig ér bennünket, valamint csak a kevésbé káros gamma-sugárzás juthat el az élő szervezetig. Ha például a járda nem megfelelő anyagból készül, annak hatása már akár a lakás megemelkedett radioaktivitásában is jelentkezhethet. Ezért is indokolt az útburkolatok saját radioaktivitásának, valamint a talaj-radioaktivitást módosító hatásának vizsgálata.

## A talaj radioaktivitásának jellemzői

A talajok természetes radioaktivitási szintje elsősorban az alkotó ásványok kémiai összetételétől, a geológiai viszonyoktól, a meteorológiai és környezeti paramétereiktől, valamint a mezőgazdasági műveléstől függ.

Az ásványokban, kőzetekben megtalálhatók az alapvető radioizotópok, a  $^{40}\text{K}$ , a  $^{238}\text{U}$ , a  $^{235}\text{U}$ , a  $^{232}\text{Th}$ , valamint ezek nagyszámú radioaktív bomlási terméke. Az *ásványok* közül maximális radioaktivitással az urán- és tóriumásványok rendelkeznek (uraninit, thorbernit stb.), magas radioaktivitásúak az úgynevezett ritka járulékos ásványok (cirkon, monacit, xenotim stb.), viszonylag magas aktivitásúak a fontosabb járulékos ásványok (apatit, magnetit stb.), normál radioaktivitásúak a másodlagos kőzetképző ásványok (biotit, muszkovit stb.), gyengén radioaktívak a fő kőzetalkotó ásványok (földpátok, földpátpótlók, csillámok stb.), alacsony aktivitásúak a piro-

xének és a bázisos plagioklászok és végül igen alacsony radioaktivitásúak az olivinek és a gránátok [1].

A *kőzetek* radioaktivitása az eredettől, az anyagi összetételtől, a kortól, és az utólagos hatásoktól függ. Általánosságban elmondható, hogy a vulkáni kőzetek közül a savanyú kőzetek magas, a bázikus kőzetek alacsony U-, Th- és K-tartalommal rendelkeznek. Az üledékes kőzetek közül az agyagos kőzetek magas, a homokos kőzetek alacsony radioaktivitást mutatnak (*1. táblázat*).

kőzetcsoport	kőzet	elemtartalom		
		U (10 <sup>4</sup> %)	Th (10 <sup>4</sup> %)	K (%)
magmás kőzetek	piroxenit	0,03	0,08	0,15
	mélylési gabbró, diabáz	0,6	1,8	0,7
	mágmás kőzetek diorit, kvarcdiorit	1,8	6	1,8
	leukogranitok	7	40	4
	bazaltok	0,7	2,3	1
	kiömlési andezitek	1,2	4	1,7
	mágmás kőzetek dácitok	2,5	10	2,3
	riolitok	4,7	19	3,7
metamorf kőzetek	eklogitok	0,2	0,4	0,8
	amfibolit	0,7	1,8	0,6
	márványok, kristályos mészkövek	1,1	2,2	0,2
	metamorf homokkővek	2,7	9,2	2,5
üledékes kőzetek	homokkővek	2,9	10,4	1,7
	agyagok	4	11,5	2,7
	mészkövek	1,6	1,8	0,3

Összességében legnagyobb radioaktívelem-tartalma a vulkáni eredetű savanyú magmás kőzeteknek, legkisebb a mészkőnek van [1]. A homok aktivitása erősen változó: akkor magas, ha jelentős mennyiségben tartalmaz cirkont, monacitot vagy xenotimot, mert ezeknek az ásványoknak U- és Th-koncentrációjuk nagy.

A talajok természetes radioaktivitásának jelentős részét a  $^{40}\text{K}$  izotóp okozza (2. táblázat), ami főleg a talaj kaolinit és hidrocillám tartalmához kötődik. A  $^{40}\text{K}$  béta- és gamma-sugárzó izotóp, a természetes káliumban 0,0119%-ban fordul elő. A talajok átlagos K-tartalma 1–2% körüli érték, de a gránitos kőzetekből képződő talajok esetén elérheti a 3–4%-ot is, mert azok igen magas kaolinit-tartalmúak. A talajok káliummal történő trágyázása jelentős mértékben növeli a talaj aktivitását.

Egy-egy elem feldúsulása, illetve migrációja a földkéregben elsősorban a geokémiai és a kőzetfizikai viszonyoktól függ. Az urán például magas oxigéntartalmú és savas kémhatású vizekben alkot jól oldódó vegyületeket. Ilyen vizekben az urán – kőzetből való kioldódás és diffúzió útján – nagy távolságokra képes migrálni, miközben az ércettest urántartalma jelentősen csökken. A rádium csak kloridos vizekben ad jól oldódó vegyületet, ezért a rádium csak kisméretű szóródási udvarokat hoz létre. A tórium izotópjai a természetben nem alkotnak vízben oldódó vegyületeket, ezért ezek migrációja nagyon kismértékű [1].

A talaj radontartalma elsősorban az urán- és tóriumtartalom, valamint a radonexhaláció függvénye, és mivel a radonexhalációt számos paraméter (talaj fizikai jellemzői, meteorológiai viszonyok, talajlefedettség stb.) határozza meg, ezért a talajok radontartalma is igen változó: területi, éves, évszakos, és nap-szakos ingadozást is mutat.

A talaj felett mérhető radioaktív sugárzásnál figyelembe kell venni az önabszorpció jelenségét is. A mérések azt igazolták, hogy emiatt a talajfelszínen mérhető gamma-sugárzás több mint 90%-a a felső 20 cm-es talajrétegből származik. Számításba kell venni a talaj pillanatnyi állapotát is, hiszen például a talajpórusokban lévő víz, vagy a hótakaró bizonyos mértékben árnyékolja a gamma-sugárzást. A hó esetében elsősorban a víztartalom a meghatározó: 10 cm-es vízréteggel egyenértékű víztartalom esetén körülbelül 50%-kal csökken a kibocsátott gamma-sugárzás mértéke.

A talajt számos radioaktív izotóp is szennyezi, amelyek az atomerőművekből, atomtechnikai létesítményekből, valamint a műtrágyázás során jutnak a környezetbe, de például a széntüzelésű erőművek környékén, illetve kőszénbányák meddőhányóinál is nagymértékben megemelkedhet a talaj U-, Th- és Ra-tartalma. Ezekén kívül az atomrobbantási kísérletek maradványaival is számolni kell. Legnagyobb jelentősége a  $^{137}\text{Cs}$ - és a  $^{90}\text{Sr}$ -izotópnak van. A MÉM Radiológiai Adatszolgáltató és Ellenőrző Hálózat adatai szerint a magyarországi talajok összbeta-aktivitása 705 Bq/kg, ezen belül a  $^{90}\text{Sr}$ -aktivitás 21 Bq/kg, a  $^{137}\text{Cs}$ -aktivitás 16 Bq/kg érték, ami azt jelzi, hogy a radioaktív szennyezettségből adódó aktivitás jóval kisebb, mint a  $^{40}\text{K}$ -tól származó aktivitás [2].

2. táblázat		
<b>Magyarországi talajminták természetes eredetű fajlagos aktivitása*</b>		
izotóp	fajlagos aktivitás (Bq/kg)	
$^{40}\text{K}$	602 ± 146	
$^{238}\text{U}$ leányelemei	$^{234}\text{Th}$	85 ± 36
	$^{226}\text{Ra}$	111 ± 64
	$^{214}\text{Bi}$	45 ± 29
	$^{214}\text{Po}$	49 ± 32
$^{232}\text{Th}$ leányelemei	$^{228}\text{Ac}$	40 ± 12
	$^{212}\text{Bi}$	39 ± 16
	$^{212}\text{Pb}$	39 ± 11
	$^{208}\text{Tl}$	40 ± 9

\* Az Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet 1980-as mérési eredményei

A radioaktív szennyezettség tekintetében a talajnak főleg közvetítő szerepe van, mert megköti a levegőből, a felszíni vizekből kikerülő radioaktív anyagokat, majd átadja az élő szervezeteknek. Mértéke függ a földtani felépítéstől és a domborzati viszonyoktól: sík területeken például jelentősebb, mint a lejtős vidékeken, mert a csapadékból származó izotópok – a gyors lefolyás miatt – a lejtős területeken kevésbé tudnak megkötődni, a már megkötődött izotópok pedig az erózió következtében a lejtőkről a mélyebb területekre jutnak. A szennyezettség mértékét illetően a talaj mechanikai szerkezete is meghatározó. A könnyűszerkezetű talajokban gyorsan a mélyebb rétegekbe mosódnak az anyagok, az agyagos területeken viszont jól adszorbeálódnak az izotópok. A zeolitoknál jelentős az ioncsere folyamata. A radioaktív izotópok nagy része nedves ülepedéssel jut a földfelszínre, egyes mérések szerint a kontaminációs szint és a csapadék mennyisége között egyenes arány írható fel. A szennyezőanyagok mozgását a talajban a talajjal való kölcsönhatás, a csapadék beszívargási sebessége és a talajvízáramlás sebessége határozza meg. A talajvíz feletti telítetlen zónában például jóval lassabb az izotópok vándorlása, mint a telített zónában. A különböző izotóptól származó szennyezettség mértéke eltérhet azért is, mert különböző mértékben adszorbeálódnak, például a Pu nagymértékben, a Sr pedig alig adszorbeálódik. A mezőgazdaságilag művelt területek felső rétegei kevésbé szennyezettek, mint a művelés alá nem vont területeké, ugyanis a talajforgatás következtében a szennyezőanyagok a mélyebb rétegekbe is lejutnak [3].

## A terepi gamma-sugárzás vizsgálata

Egy adott terület radioaktivitásának felmérésére, a radiometriás térkép felvételére legelterjedtebb módszer az összgamma-sugárzás mérése. A gamma-sugárzás áthatolóképessége ugyanis igen nagy, így a mé-

lyebb talajrétegekből származó gamma-fotonok is érzékelhetőek, valamint – mivel az alfa- és béta-sugárzást gamma-sugárzás is kíséri – minden radioaktív izotóp bocsát ki gamma-fotont. A kőzetekre vonatkozóan 50–60 cm a telítési vastagság, ennél mélyebbről nem lép ki gamma-foton a talajfelszínen. A radon viszont nagyobb mélységekből is a felszínre vagy a felszín közelébe kerülhet, leányelemei megkötődhetnek a talajszemcséken, így megnövelhetik a talajréteg eredeti aktivitását, jelezvén a mélyebb rétegek magasabb radontartalmát.

A közvetlenül a talaj felett történő radioaktivitás-mérésnél legnagyobb szerepet a teresztikus sugárzás játszik, tipikusan a teljes beütésszám 88%-át adja. A kozmikus sugárzás részesedése 2,5%, a levegőből származó radon bomlástermékeké 8% – de ez ettől erősen eltérhet –, a detektoranyagé 1,5%. Mivel a talaj radioaktív sugárzása nagymértékben függ a külső tényezőktől is, a terepi összehasonlító vizsgálatok esetén minden egyes mérést közel azonos időjárási viszonyok között kell elvégezni [4].

Az útburkolatok felett mérhető radioaktivitást több tényező is meghatározza, így többek között:

- az alaptalaj radioaktivitása,
- az útburkolat sugárzásárnyékoló és radonszigetelő hatása,
- az útburkolattól származó sugárzás,
- az épített környezet hatása.

Az alaptalaj hatása elsősorban a radonon keresztül érvényesülhet, hiszen a jellemzően 40–50 cm vastag útburkolati rétegen a gamma-sugárzás már nem jut át, a radon viszont az útburkolat pórusain feljuthat. Ha az útburkolat felső rétege elzárja a radon útját, és ha a radon bent reked, megnő a felszíni dózisteljesítmény. Figyelembe kell venni, hogy maga az útburkolati anyag is bocsát ki radioaktív sugárzást, hogy bizonyos mértékben árnyékolja a talaj gamma-sugárzását, valamint azt is, hogy a földmű készítésekor tömörítik az eredeti altalajt (esetleg talajcsere is történhet). A felsorolt hatások együttesen határozzák meg, hogy az útburkolat növeli, vagy csökkenti egy terület eredeti gamma-dózisteljesítményét.

## Mérések Szegeden

2000-ben hordozható szcintillációs detektorral Szegeden megvizsgáltuk a talaj, a füves területek, valamint az aszfaltburkolatok felett mérhető összgamma-dózisteljesítményt, és elvégeztük azok összehasonlító elemzését. A méréseket közvetlenül a felszínen, 0,4–3 MeV közötti energiatarományban végeztük.

Méréseink szerint (3. táblázat) az aszfaltútburkolat felett mérhető a legkisebb, a füves területeken pedig a legnagyobb dózisteljesítmény. Az aszfaltréteg tehát esetünkben szigeteli a talaj sugárzását, a burkolat saját sugárzása ehhez képest kisebb mértékű. A füves területeken mérhető nagyobb intenzitás a növényzet által megkötött <sup>40</sup>K-nak, <sup>90</sup>Sr-nak, <sup>210</sup>Po-nak és <sup>14</sup>C-nak is köszönhető.

terület típus	várható érték (nGy/h)	medián (nGy/h)	szórás (nGy/h)	tartomány (nGy/h)
talaj 280 mérési pont	68,0	67,1	9,9	41,8–112,9
füves terület 121 mérési pont	73,1	73,6	12,32	46,2–107,8
aszfaltút 673 mérési pont	55,2	53,8	9,9	34,7–104,4

Az összehasonlító elemzéshez a *Coben-féle hatás-mérték*-vizsgálatot végeztük el, ami a minták átlagát hasonlítja össze. Ez az eljárás akkor alkalmazható, ha a mért értékek jellemzésére az átlagérték alkalmas, vagyis az eloszlás nem túlságosan ferde. A hatás-mérték ( $\Delta$ ) megadásához a két minta átlagértékére ( $X_1$  és  $X_2$ ) és a szórások ( $\sigma_1$  és  $\sigma_2$ ) négyzetére van szükség:

$$\Delta = \frac{X_1 - X_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}}}$$

Ha a kapott hatás-mérték 0,2 körüli, akkor kicsi, ha 0,5 körüli, akkor közepes, ha 0,8 körüli, akkor nagy eltérés van a két minta átlagértéke között [5].

Két minta értékének összehasonlítására egy rangstatisztikai jellemzőt, a sztochasztikus különbséget ( $a$ ) alkalmaztuk. Ez azt mutatja meg, hogy az egyik mintából véletlenszerűen kiválasztott adat milyen valószínűséggel lesz nagyobb a másik mintából szintén véletlenszerűen kiválasztott adathoz [5]. A számítások szerint legnagyobb eltérés a füves és az aszfaltburkolatú területek dózisteljesítmény-átlaga között tapasztalható. A füves terület és a talaj dózisteljesítmény-átlaga közepesen eltérő, a dózisok eloszlása viszont szignifikánsan különbözik egymástól (4. táblázat).

Hasonló méréseket végeztünk egy tér területén is, ahol az aszfaltburkolatos járda és a füves területek dózisteljesítményét lehetett összehasonlítani (5. táblázat).

Az összehasonlító tesztek eredményei azt mutatják, hogy az aszfaltjárda és a füves terület dózisteljesítmény-átlaga közepesen tér el egymástól ( $\Delta = 0,58$ ,  $a = 0,34$ ),

terület típus	$\Delta$	$a$
füves terület – aszfaltút	1,60	0,81
talaj – aszfaltút	1,28	0,70
füves terület – talaj	0,47	0,37



területtípus	várható érték (nGy/h)	medián (nGy/h)	szórás (nGy/h)	tartomány (nGy/h)
füves terület 47 mérési pont	59,7	59,8	8,9	40,9–78,1
aszfaltjárda 26 mérési pont	65,3	66,7	10,3	37,8–82,1

míg az aszfaltútburkolat és a füves területek között nagymértékű eltérés adódott. A dózisteljesítmények eloszlása is kevésbé eltérő az aszfaltjárda–füves terület összehasonlításban, mint az aszfaltút–füves terület kapcsolatban. A kisebb eltérés abból adódik, hogy az aszfaltjárda vastagsága fele az aszfaltútburkolaténak, és a hozzá tartozó földmű is kisebb mélységű.

2000 márciusában egy társasház környezetében került sor összgamma-sugárzás mérésére. A mérési pontok között füves terület, aszfaltjárda, betonút, kavicsos terület, bitumenes útjavítás egyaránt szerepelt. A 6. táblázat a méréssorozat néhány eredményét mutatja be.

A mérési eredmények alapján a következő megállapítások tehetők:

- A füves területeken mérhető összgamma-dózisteljesítmény 50,0 és 92,1 nGy/h közötti, tehát igen eltérő. A kiugróan magas érték egy új építésű magánház előtt adódott, ahol építőanyag-maradékot helyeztek el.

- A társasház játszóterén a hinta környékét kavicssal töltötték fel. Az itt használt kavics viszonylag magas aktivitású; minél nagyobb volt a kavics/talaj arány, annál nagyobb sugárzás adódott. A hinta előtti erősen letaposott kavics magasabb dózisteljesítményű, mint a hintától 3 méterre lévő. Ennek két oka van: egyrészt a letaposás miatt a hinta közelében jóval tömörebb a kavics, másrészt a hinta előtt kirugdosták a talajt a kavicszemek közül.

- A homok esetén is jól megfigyelhető, hogyan növeli a tömörítés a sugárzás mértékét. A csúszda végében lévő erősen összenyomott homok nagyobb átlagsugárzású, mint a csúszda melletti lazább homok. Szeged más területein is elvégezve hasonló méréseket megállapítható, hogy a tömörebb talajok mindig magasabb radioaktivitást mutatnak. Például a futballpályák kitaposott részén, a 16-os vonal közelében, átlagosan kétszer nagyobb a dózisteljesítmény, mint a kevésbé tömörített részeken, például a kapuban és a pálya külső részén. Szintén ezt igazolja, hogy a salakos futópályák belső, jobban használt oldalán átlagosan 1,4-szer nagyobb a dózisteljesítmény, mint a külső oldalon.

- Az erősen beépített területeken sokkal kisebb területi homogenitás mutatkozik, mint például egy park, vagy egy nem lakott terület esetében. Ennek egyik oka, hogy a sűrű beépítettség miatt jelentős hatása van az épületek melléksugárzásának is. Másrészt az építkezések során módosul a talaj összetétele, például az építkezésből ott maradt anyagok miatt, valamint változik a talaj tömörsége is.

terület	megjegyzés	dózisteljesítmény (nGy/h)		
		átlag	medián	szórás
füves	1.	50,0	50,0	2,0
füves	2.	56,0	56,1	0,9
füves	3.	92,1	91,2	4,4
füves	4.	64,0	66,1	5,6
tömör kavics	kavicssal feltöltött terület, hinta előtt	99,3	104,6	10,3
kavics	kavicssal feltöltött terület, hintától 1 m-re	73,6	72,4	3,5
füves kavics	kavicssal feltöltött terület, hintától 2 m-re	69,8	67,2	4,3
füves kavics	kavicssal feltöltött terület, hintától 3 m-re	52,3	54,6	3,2
homokos talaj	járda mellett	49,7	48,6	2,1
laza homok	csúszda mellett	55,7	55,6	1,9
tömör homok	csúszda végén	62,3	62,2	2,7
talaj		47,0	49,0	4,7

Az útburkolatok radioaktív sugárzást módosító hatásának vizsgálatát 2004-ben kezdtük el, erre csatornázási munkálatok során volt lehetőségünk. Ekkor a különböző útépitési fázisokban külön lehetett vizsgálni a burkolatrétegek aktivitását: az altalaj, a földmű, az útalap, valamint a kész aszfalt-, vagy betonburkolat felett mérhető sugárzást. A mérést közvetlenül a vizsgált rétegek fölött végeztük el, igyekeztünk minél több, közel azonos építési fázisban lévő mérési pontot felvenni, maximum 5 méteres távolságon belül. A mérések alapján a következő megállapítások tehetők:

- Az új útburkolattal ellátott szakaszokon a sugárzás mértéke átlagban 30%-kal nagyobb, mint az altalajé. Ez magyarázható magának a burkolatnak a radioaktív sugárzásával, de figyelembe kell venni a talajból származó és a burkoló rétegben megkötődött radon-leányelemek hatását is. (A 3. táblázat adataival összevetve látható, hogy ott a talajhoz viszonyítva az aszfaltburkolat felett magas, míg itt alacsony dózisteljesítmények adódtak. Ez is azt igazolja, hogy nem tehető általános megállapítás arra, hogy az útburkolat miként hat a talajsugárzásra.)

- A csatornázás után stabilizátorként használt betonréteg felett 35%-kal kisebb sugárzás mérhető, mint az eredeti aszfaltburkolatú helyeken. Ennek oka a burkolat anyagi összetétele. A beton ugyanis körülbelül 70%-ban mészkövet tartalmaz, csak 25%-ban agyagot és 5%-ban ásványi töltőanyagot. Az aszfalt viszont a töltőanyagokon kívül bitumenből áll, emiatt némi uránt és rádiumot is tartalmaz, ebből adódik a jelentősebb aktivitása. Figyelembe kell venni a porozitásbeli

eltérést is: az aszfalt – a betonnal ellentétben – kis porozitású, a radon rajta keresztül nem tud kilépni, és a bent maradó leányelemek megnövelik a felületi dózisteljesítményt.

- A csatornázás során visszatöltött talaj sugárzása nagyobb, mint az eredeti talaj sugárzása. Az eltérés mértéke változó: egyes esetekben nem haladja meg a szórást, de akár 50%-os különbség is lehet. A talaj a radioaktív anyagok eloszlása szempontjából nem teljesen homogén, így akkor sem várható teljesen azonos aktivitás, ha a feltöltéshez az eredeti talajt használták. Visszatemetéskor az addig 0,5–1 m mélyen lévő talajréteg kerül felülre, ennek a rétegnek a radioaktívanyag-tartalma pedig nagyobb, mint az eredeti felső rétegé volt. A mélyebb rétegekbe ugyanis a csapadékkal be-mosódnak a radioaktív anyagok, mind a csapadékkal kihulló, mind a felszínre előzőleg lerakódott szennye-ződések. A kivett talaj szerkezete is jelentősen megvál-tozhat: a kiásás során lazább, hézagosabb lesz a talaj, a visszahelyezést követően viszont tömörödik.

- A csatornacső behelyezése lényegesen nem csökkentette az útburkolaton mérhető aktivitást. Ennek magyarázata:

- a csatornacső átmérője mindössze 0,2 m a főcső, és 0,12 m a bekötőcső esetén,
- a csövek viszonylag nagy, 2–4 méteres mélység-ben húzódnak.

## Összegzés

Az útburkolatok radioaktivitásának vizsgálata minden bizonnyal nem tartozik a legégetőbb környezetvédel-mi feladatok közé, mert az innen származó radioaktív sugárzás biológiai hatása elenyésző mértékű. De egy sportpálya esetén már számottevővé is válhat, ha ott hosszú időt töltenek el a sportolók, vagy a sugárzásra érzékenyebb gyermekek. Azok az ismeretek, amelye-ket az ilyen vizsgálatok során nyerünk, az építőipar

egyéb területein is hasznosíthatók. Így például az épületek kialakításakor figyelembe vehető, hogy az egyes építőanyagok milyen radioaktivitást mutatnak, és azt a rétegvastagság, a tömörség hogyan módosítja. Ez is hozzásegíthet ahhoz, hogy a lakóépületeinktől és a munkahelyeinktől származó dózisterhelést a le-hető legalacsonyabb szintre csökkentsük.

Hazánkban jelenleg az útépitőanyagok radioaktivi-tásának korlátozására nincs szabályozás. Az úgyneve-zett újrahasznosított betonadalék-anyagokra vonatko-zó irányelvek között azonban szerepel, hogy nem szabad adalékanyagként alkalmazni:

- kazánsalakot,
- acélgyártási Martin-salakot,
- azokat a radioaktív salakokat, amelyek radioakti-vitási veszélyességi foka nagyobb, mint 1 Bq/kg. A radioaktivitási  $H$  veszélyesség foka a  $c$  Th-, Ra- és K-koncentráció segítségével adható meg:

$$H = \frac{c_{\text{Th}}}{259} + \frac{c_{\text{Ra}}}{185} + \frac{c_{\text{K}}}{4810}.$$

A törvényi szabályozás megalkotását természetesen komoly vizsgálatoknak kell megelőznie, ehhez járul-hatnak hozzá a mi méréseinkhez hasonló mérések. Nekünk pedagógusoknak az oktatás területén van lehetőségünk arra, hogy környezetünk radioaktivitá-sának fontosságára felhívjuk a figyelmet, és így egyre inkább a környezettudatos gondolkodás részévé te-gyük a radioaktív háttérsugárzás figyelembe vételét.

## Irodalom

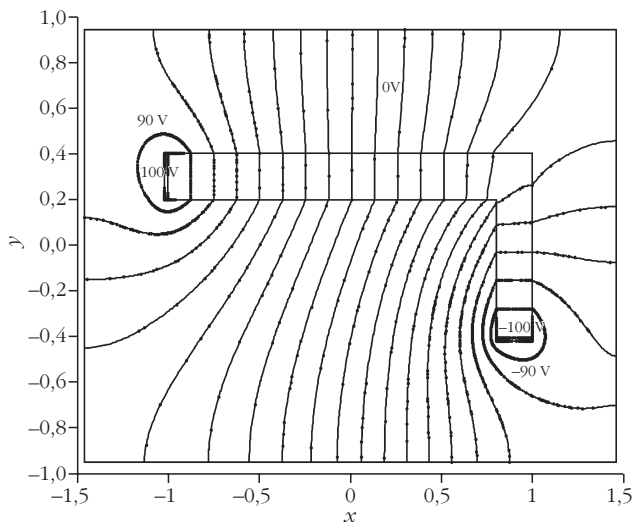
1. Steiner F., Várhegyi A.: *Radiometria*. Tankönyvkiadó, Buda-pest, 1991.
2. *MÉM éves jelentés*. MÉM Radiológiai adatszolgáltató és Ellenőrző Hálózat, Budapest, 1980.
3. Szabó S. A.: *Radioökológia és környezetvédelem*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 1985.
4. Szederkényi T., Pál Molnár E., Vados I.: *A radioaktivitás környe-zetvédelmi vonatkozásai*. KÖTKORC segédanyag, Szeged, 1994.
5. Vargha A.: *Matematikai statisztika*. Pólya Kiadó, Budapest, 2000.

# ÁRAMVEZETŐHÖZ KAPCSOLÓDÓ FELÜLETI TÖLTÉS ÉS KÜLSŐ VILLAMOS TÉR

Veszely Gyula  
BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Az elektrodinamika-könyvek legtöbbször az elektrosztatikát és a stacionárius áramlási teret teljesen független problémakörként tárgyalja. Pedig az áramvezető külső felületén megjelenő töltés hozzájárul az áramvezetőbe-li villamos tér kialakításához, amely meghatározza az áramfolyás irányát. A probléma nehézségét az adja, hogy a külső villamos tér meghatározásához ismer-nünk kell az áramvezető sztatikus elektromos környe-zetét, matematikai nyelven a peremfeltételeket. Az irodalomban található analitikus módszerek közül *Schaefer* [1] zérus potenciálú hengerrel veszi körül az

áramot hordozó hengeres vezetőt, így biztosítva a szá-mításhoz szükséges peremfeltételt. *Marcus* [2] megis-métli [1] számítását. *Heald* [3] az analitikus számítható-ság kedvéért ötletes modellt vezet be: áramköre egy zérus falvastagságú körhengerből áll, ennek egy zérus szélességű felhasításában helyezkedik el a „vonal” feszültségforrás. Ez a geometria kétdimenziós analiti-kus számítást tesz lehetővé. Mintegy melléktermék-ként a teljesítményáramlás Poynting-vektoros képe is kiadódik. Demonstrációt is lehetővé tevő fizikai mo-dellt ismertet *Jefimenko* [4]. Üveglapra átlátszó vezető



1. ábra. Derékszögben megtört vezető az ekvipotenciális vonalakkal. Az elrendezés a papír síkjára merőleges irányban végtelen hosszúnak tekintendő (síkprobléma). A vezető végein látható kis téglalapok az elektródák, a bal oldali potenciálja 100 V, a jobb oldalé  $-100$  V. A hosszegység tetszőleges.

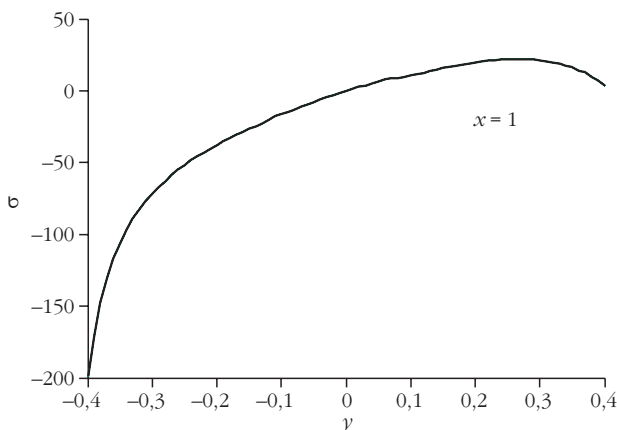
tintával rajzolja fel az áramkört, a villamos erőteret a rászórt fűmaggal teszi láthatóvá és az egészet kivetíti. Hasonló bemutatót ír le Parker [6] is.

Jelen közlemény célja, hogy felhívja a figyelmet a jelenségkör numerikus térszámítás segítségével történő vizsgálatára. A szerző a MATLAB 6.6 Partial Differential Equation Toolboxát alkalmazta, de jól használható a QuickField 5.5 ingyenesen letölthető diákverziója [8] is. Kétféle elrendezést vizsgálunk: egy derékszögben megtört vezetőt és egy ellenállást és feszültségforrást tartalmazó zárt hurkot. Megjegyezzük, hogy a felületi töltéssűrűség egyenes vezető esetén is fellép.

## Derékszögben megtört vezető

Az elrendezést a számított ekvipotenciális vonalakkal az 1. ábra mutatja. Az elrendezés síkprobléma, ami azt jelenti, hogy a papír síkjára merőleges irányban az elrendezés és a tér változatlan. A vezető tehát egy L-alapú hasáb. A vezető végein látható kis téglalapok

2. ábra. A felületi töltéssűrűség a vezető jobb oldali szélén alulról felfelé haladva. Az egységek tetszőlegesek.



az elektródák, a bal oldali potenciálja 100 V, a jobb oldalé  $-100$  V. A vezető fajlagos vezetőképességét egységnyinek, a beágyazó szigetelő vezetőképességét  $10^{-10}$ -nek vettük, mert a programrendszer nem engedi meg a zérus vezetőképességet. Az elrendezést a befoglaló nagy téglalap oldalai mentén szigetelő falakkal zártuk le, ami azt jelenti, hogy ezekre az oldalakra nincs az áramsűrűségnek és így a  $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$  differenciális Ohm-törvény alapján a térerősségnek sem merőleges komponense. Ezzel a választással tulajdonképpen [4] kísérletét szimuláljuk, ahol a kis vezetőképességű üveglap véges méretű volt.

Az ekvipotenciális vonalakkal az alábbiak láthatók:

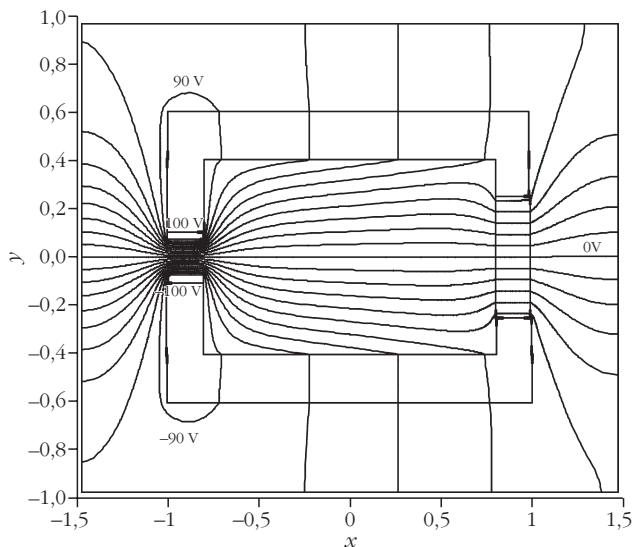
1) Az ekvipotenciális vonalak merőlegesek a külső peremre, vagyis a térerősség és áramsűrűség peremre merőleges komponense zérus (zérus Neumann-peremfeltétel).

2) A vezető egyenes szakaszain az ekvipotenciális vonalak merőlegesek a vezető szélére, vagyis itt az áramsűrűség a vezető szélével párhuzamos. Emellett a potenciál a távolsággal arányosan csökken, ahogy az Ohm-törvény megkívánja. A kanyarban a vezetőbeli ekvipotenciális vonalak elferdülnek az áramsűrűség kanyarodásának megfelelően.

3) Ahol a vezető belsejében az ekvipotenciális vonal merőleges a vezető szélére, ott a vezető szélének belső oldalán nincs a térerősségnek és így az eltolási vektornak sem normális komponense. A folytonossági feltétel szerint tehát a vezető szélén fellépő felületi töltéssűrűség a szél külső oldalán fellépő eltolási vektor normális komponensével egyenlő. Ennek előjele az 1. ábra ekvipotenciális vonalaiból könnyen megállapítható. Tekintsük például a vezető felső vízszintes felületét. Körülbelül az  $x = -0,1$ -es koordinátáig a felületi töltéssűrűség pozitív (a térerősség normális komponense kifelé mutat), majd negatívvá válik (a térerősség normális komponense befelé mutat). A vezető alsó vízszintes felületén a felületi töltéssűrűség végig pozitív, a bal oldali függőleges felületén végig negatív, a jobb oldali függőleges felületén körülbelül az  $y = 0$  koordinátáig pozitív, majd onnan negatív. Ezek a felületi töltéssűrűségek a vezető belsejében fellépő tér megfelelő kialakításával mintegy terelik az áramsűrűségeket. A felületi töltéssűrűségeket a programrendszerben adott térerősség-számítás segítségével ki is számítottuk, közülük a vezető jobb oldali szélén fellépőt a 2. ábrában ábrázoltuk is.

## Feszültségforrásból és ellenállásból álló áramkör

Az elrendezést az ekvipotenciális vonalakkal a 3. ábra mutatja. Ez az elrendezés is síkprobléma, vagyis az elektródák, az ellenállás, a bekötő vezetékek mind hasábok, amelyeknek valamely síkkal való metszete látható az ábrán. Az elektródák potenciálja 100 V, illetve  $-100$  V. Az ellenállás (jobb oldali téglalap) vezetőképessége 0,1, a bekötő vezetékek (U-alakú idomok) vezetőképessége 1, a környezet vezetőképessége

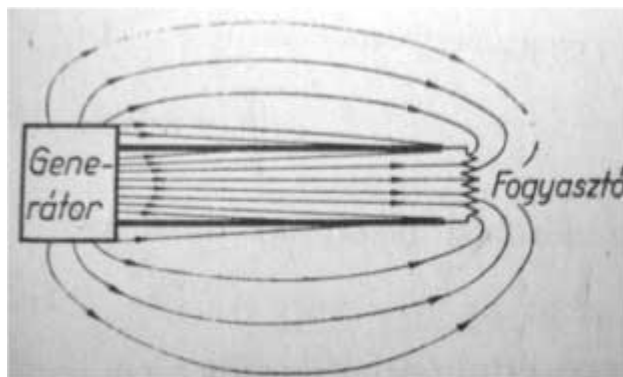


3. ábra. Feszültségforrást és ellenállást tartalmazó zárt áramkör a számított ekvipotenciális vonalakkal. Az elrendezés a papír síkjára merőlegesen végtelen hosszúnak tekintendő (síkprobléma). A bal oldali kis téglalapok az elektródák 100 V és -100 V potenciállal. Az ellenállás a jobb oldalon látható téglalap, az U alakú idomok a bekötő „huzalok”. A majdnem zárt idom *belsejében* elhelyezkedő ekvipotenciálisok a Poynting-vektor erővonalaihoz azonosak.

ge  $10^{-10}$ . A befoglaló nagy téglalap oldalai mentén itt is zérus merőleges irányú áramsűrűséget vettünk fel peremfeltételként.

Az ekvipotenciális vonalak menetéből látható, hogy a bekötő vezeték és az ellenállás egyenes szakaszain az áramsűrűség párhuzamos a vezetők szélével. Az ellenállásban a térerősség tízszer akkora, mint a bekötő vezetékben.

Figyelemmel az áramfolyás irányára és arra, hogy ez az áramfolyás a papír síkjára merőleges irányban nem változik, azt mondhatjuk, hogy az elrendezés mágneses tere olyan mint egy hosszú, téglalap keresztmetszetű tekercs, azaz *belül* merőleges a papír síkjára (kívül a mágneses térerősség zérus). Ekkor azonban a Poynting-vektornak a papír síkjában kell feküdnie. Mivel a Poynting-vektornak a villamos térerősségre is merőlegesnek kell lennie, azért a Poynting-



4. ábra. Az energiaáramlás Poynting-vektoros szemlélete [9]. A szerző engedélyével.

ting-vektor erővonalai (az áramkör belsejében) egybeesnek az ekvipotenciális vonalakkal. Az ábra szépen illusztrálja, hogy a teljesítmény a szigetelőben áramlik. A forrásból kilépve a Poynting-vektor erővonalainak egy része a bekötő vezetékbe lép be, reprezentálva az abban fellépő veszteséget, az erővonalak másik része pedig eljut a fogyasztóba.

A szerzőnek nagy szellemi örömet okozott, hogy a Simonyi–Zombory-könyvben [9] szereplő és általa mindig sematikusnak tekintett 4. ábra ilyen gyakorlati háttérrel rendelkezik.

#### Irodalom

1. C. Schaefer, *Einführung in die theoretische physik 3/1* (1931) (Walter de Gruyter, Berlin), 175–184.
2. A. Marcus: The electric field associated with a steady current in long cylindrical conductor. *Am. J. Phys.* 9(1941) 225.
3. M. A. Heald: Electric fields and charges in elementary circuits. *Am. J. Phys.* 52(1984) 522.
4. O. Jefimenko: Demonstration of the electric fields of current-carrying conductors. *Am. J. Phys.* 30(1962) 19.
5. W. G. V. Rosser: Magnitude of surface charge distributions associated with electric current flow. *Am. J. Phys.* 38(1970) 265.
6. S. Parker: Electrostatics and current flow. *Am. J. Phys.* 38(1970) 720.
7. R. N. Varney, L. H. Fisher: Electric fields associated with stationary currents. *Am. J. Phys.* 52(1984) 1097.
8. [http://www.quickfield.com/free\\_soft.htm](http://www.quickfield.com/free_soft.htm)
9. Simonyi K., Zombory L.: *Elméleti Villamosságtan*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (2000) 55.

## BOLYAI JÁNOS EGYIK LEGHOSSZABB FIZIKA TÁRGYÚ KÉZIRATÁRÓL

Oláh-Gál Róbert

Babeş–Bolyai Egyetem, Matematikai-Informatikai Kar,  
Csíkszeredai Tagozat, Informatikai Rendszerek Tanszék

A *Fizikai Szemlé*ben Gábos Zoltán professzor értékes cikkeket közölt a Bolyai–Lobacsevszkij-féle gravitációs törvényről [1, 2]. *Bolyai*ról ezt írja:

„...Egy 1835-ös keltezésű kéziratában a nemeuklidészi alapra helyezett mechanika kidolgozását szorgalmazta. Első lépésként egy új, nemnewtoni gravitációs törvényt adott. Az  $M$  tömegű test által, tőle  $r$  tá-

volságban lévő,  $m$  tömegű testre gyakorolt centrális erő radiális komponensére a newtoni elmélet az

$$F = -K \frac{mM}{r^2} \quad (18)$$

képletet adta. A (18) jobb oldalán szereplő törtet  $4\pi$ -



vel bővítve a nevezőben, a gömbfelszínre érvényes euklideszi kifejezés jelentkezik. A Bolyai–Lobacsevszkij-geometria a gömbfelszínre a

$$4\pi k^2 \sinh^2 \frac{r}{k} \quad (19)$$

kifejezést adta. Bolyai erre alapozott, amikor (18)-at az

$$F = -K m M \left( k^2 \sinh^2 \frac{r}{k} \right)^{-1} \quad (20)$$

erőképlettel helyettesítette. Bolyai világában  $k$ -nak a természetes hosszegység szerepet szánta, és a valószínűleg megfelelő  $k$  érték megadását a megoldandó feladatok körébe sorolta.

Bolyai János erőtvényével fél évszázaddal előzte meg korát. *P. Stäckel*, aki még láthatta a törvényt tartalmazó kéziratot, az 1903-ban közölt *A többméretű sokaságok mechanikájáról* című dolgozatában a következőket írta: „Érdekes, hogy egy bolygó mozgását a központi test körül Killing (1885-ben) ugyancsak a Bolyai Jánostól föltételezett vonzási törvény mellett discutálta.” Később Stäckel 1914-ben kiadott *Bolyai Farkas és Bolyai János geometriai vizsgálatai* című könyvében azt is jelezte, hogy Lobacsevszkij Bolyaival csaknem egy időben szintén megállapította a (20) alatti törvényt, amelyet a *Kazanyi Egyetem Tudományos Közleményeiben* közölt. Ezért (20)-at joggal nevezhetjük Bolyai–Lobacsevszkij-féle gravitációs törvénynek.”

A fenti közleményben Gábos professzor Paul Stäckel könyvére alapozva azt írja, hogy Bolyai János eredeti kéziratának nyoma veszett.

Szerencsére a kézirat megvan és igazolható, hogy Bolyai János vizsgálat alá vett egy új gravitációs törvényt, amit Gábos professzor Bolyai–Lobacsevszkij-féle gravitációs törvénynek nevez [1, 2]. Feltételezhetően ennek a kéziratnak lehetett egy letisztázott változata, amit megismert Paul Stäckel, illetve valamelyik munkatársa, aki neki magyarról németre fordította az iratot, illetve azt a részét, amit ki tudott betűzni. Ugyanis ezt a fajta kéziratot az 1900-as évek elején még nemigen olvasták ki. Erre az a bizonyíték, hogy nem említi egyetlen egy Bolyai-kutató sem, hogy Bolyai János foglalkoztatta *Bošković* elmélete.

Íme egy idézet az általunk újra megtalált Bolyai-kéziratból:

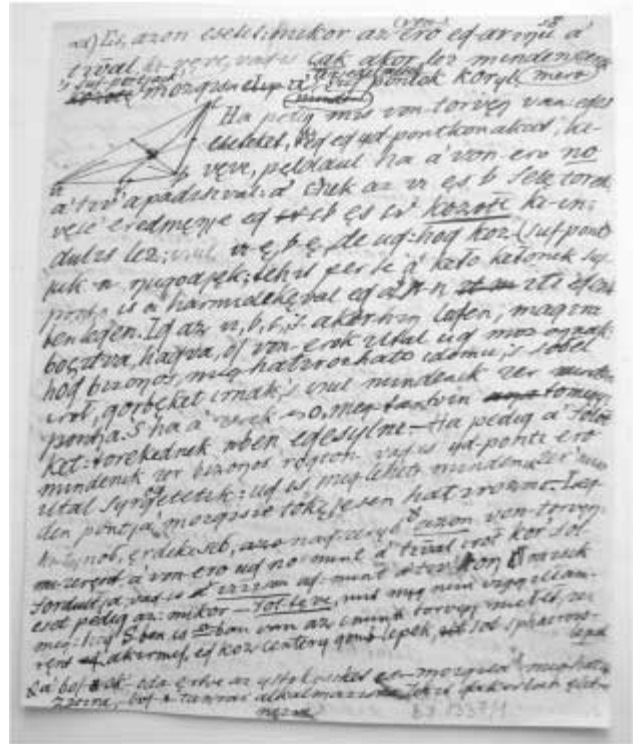
„azon von-törvény: mi-szerént a' von-erő úgy nő: mint a' távval irott kör fölfordultja, vagyis visszason úgy mint a' táv-kör; másik eset pedig az: mikor – föltéve, mit még nem vizsgáltam meg: hogy S-ben<sup>1</sup> is  $\underline{\underline{S}}$ -ban<sup>2</sup> van az iminti törvény mellett, szerént akarmely egy-köz-centerű gömb-lepek,<sup>3</sup> sőt sphaerors-lepek által is, határozott testen belüli szer<sup>4</sup> akár – az oly hatás szerénti törvény: melyet külső mindenütt egytömű (egytömögű?) gömbök egyenlő, 's külszineket,

<sup>1</sup> S-ben, vagyis a Bolyai-geometriában

<sup>2</sup>  $\underline{\underline{S}}$ -ban = megfeleltetésben van

<sup>3</sup> gömb-lepek = gömbfelszín

<sup>4</sup> szer = anyag



A megtalált Bolyai-kéziratok egy lapja [6]

rajtuk lévő hasonló gömbökre gyakorolnak – mely kérdvény? Hogy egyezik-e az erőnek a' távval vagyis inkább a' táv-körrel növelésével. (Csakugyan általánosan kell a von-erővel bánni, 's  $q = fx^5$  szerént úgy, hogy mágnesi, 's bármely lehető más testekre is legyen alkalmazható). (függetlenül szólva az Euklidesz XI Axiomától)”

Bármennyire is nehézkes a szöveg, ennek a képletszerű megfejtése az, amit Gábos professzor közölt [2]-ben.

Még két dolgot szeretnénk kiemelni a kéziratból.

Nagyon érdekes gondolat az alábbi:

„Csak Atyámtól hallám gyermek koromban, hogy egy szerben például az éppen tanult, közben kezében volt krétában annyi erő lehet, hogy tán egy bihal sem volna képes meggyőzni, bírni vele.”

Tehát az anyagban, egy kis krétában annyi erő, (amit ma energiának mondunk) van, amit egy bivaly sem volna képes kifejezni. Véleményünk szerint ennek egyik értelmezése a Bošković-féle atomelméletben keresendő. A kéziratban kétszer is történik utalás *Ruđer J. Bošković*-ra. Ismeretes, hogy *Faraday* is elfogadta Bošković atomelméletét, amely szerint az atomok közötti kötések csak óriási erővel lehet szétszakítani. Viszont a Bolyai-kutatók eddig nem tudták, nem közölték, hogy mind a két Bolyai olvasta Bošković Teleki-tékában is meglévő műveit. A Teleki-téka három Bošković-művel is büszkélkedhet [3–5]. Rendkívül modern tudományos tájékozódásról tesz ez tanúbizonyosságot. Boškovićot a modern fizikatörténetben és atomkorszak leírásában is alig említik.

<sup>5</sup> Mai jelöléssel:  $q = f(x)$

És végül: véleményünk szerint igen érdekes vízió a végtelen sebességű anyagi pont gondolata, amely mégis véges távolságot tesz meg. Egy ilyen fizikai jelenség a Bolyai-geometriának is egy elképzelhető fizikai alkalmazásra adna lehetőséget.

„NB. Képzeltet oly erő, 's mozgás is áll: hogy egy üd-pontkor<sup>6</sup> (ha nem is az egyik szer' súlypontjában) az egyik szer sőbe<sup>7</sup> éppen = végtelen legyen azután perse rögtön hasonló törvény szerént leapadóvá. És már koránt sem ismervén minden szerek vonerejét: nem is állíthatjuk: hogy nincs a' természetben de csak némely üd-pontkor, éppen végtelen sőbű mozgás; melynek azonban perse még is csak véges út az eredménye.

NB. Csepөгő 's légfolyó, 's rugonyos szereknek hason esetben (körülmények között) vizsgálja ezután 's így lehet bárhány több hasonló szabályú szer ugyan-azon tengely körül helyezve: meghatározni az egész mozgást bármely föltett vontörvény mellett, szerént.”

<sup>6</sup> üd-pont = időpont

<sup>7</sup> sőbe = sebessége

Természetesen ezenkívül sok-sok fizikai ötlet, kísérlet és eszmefuttatás szerepel a közel tízoldalas kéziratban, s a jövőben igyekeznünk majd annak teljes szövegét is közreadni.

A címben, szándékosan „egyik leghosszabb” és nem a „leghosszabb fizikai tárgyú Bolyai-féle eszmefuttatás” szerepel, mert még sok meglepetést hozhat a Bolyai-kéziratok megfejtése. Bolyai János kéziratai nehéz olvasmányok. Halmozza a jelzőket és ötleteket, gondolatmenete is csapongó, valószínűleg a kezeírása ritkán volt összhangban éles eszének száguldásával. De a legtöbb, matematikát tartalmazó kéziratára ez jellemző.

#### Irodalom

1. Gábos Zoltán: A Bolyai–Lobacsevszkij-féle gravitációs törvény. *Fizikai Szemle* 50/1 (2000) 13.
2. Gábos Zoltán: A klasszikus gravitációelméletről. *Fizikai Szemle* 54/12 (2004) 397–401.
3. Boscovich, Joseph: *De Solis et Luna*. Venetiis, 1761.
4. Boscovich, Joseph: *Abhandlung von den verbesserten dioptrischen Fernröhren*. Wien, 1765.
5. Boscovich, Joseph: *Trigonometria plana et sphaerica*. Collig. cum: Tacquet, Andreas: *Elementa Geometria*. Patavii, 1761.
6. Teleki–Bolyai Könyvtár, Bolyai Gyűjtemény, BJ 1337/1, 1', 1338/1, 1', 2, 2', 1339/ 1, 1', 1339/2, 2'.

## ALAPVETŐ FONTOSSÁGÚ EREDMÉNYEK AZ ATOMFIZIKÁBAN

Berényi Dénes  
ATOMKI, Debrecen

### Melyek az „alapvető” eredmények és miért foglalkozunk itt velük?

Ismeretes, hogy számos különböző alkalmazása van az atomfizikai eredményeknek a legkülönbözőbb tudományterületeken és a gyakorlatban. Ezekről sok cikket és könyvet közöltek akárcsak a legutóbbi években is. 2005-ben a Miskolcon rendezett CEPAS-konferencia nyitó előadásában táblázatban gyűjtöttem össze a nagyszámú különböző alkalmazási területet (Berényi [1]<sup>1</sup>).

Úgy gondolom azonban, hogy időszerű az atomfizikai kutatások jelentőségével az alapvető eredmények szempontjából is foglalkozni. Ezért választottam ezt a kérdést a mostani nyitó előadás tárgyául.

Ezzel kapcsolatban természetes módon rögtön felmerül a kérdés, hogy mit is tekintünk alapvető eredménynek. Kiderül, hogy nem is olyan könnyű ezt definiálni. Mindenekelőtt azt kell hangsúlyoznunk, hogy az alapvető jellegű eredmények következményei a tudom-

mány szélesebb területén fejtik ki hatásukat. Mondhatjuk, hogy egy eredmény annál „alapvetőbb”, minél szélesebb az a terület, amelyre hatással van. Ez azt is jelenti, hogy az alapvető eredmények között különbségek vannak, mert van amelyik „alapvetőbb” a másiknál. A leginkább alapvetőnek azt az eredményt tekinthetjük, amelyik a fizika egészére befolyással bír, sőt ezen túlmenően hatással van a természettudomány több más ágára is, végső soron a természettudomány egészére, esetleg ezen túlmenően a teljes emberi tudományosságra és világfelfogásunkra.

### Visszatekintés és a jelenlegi helyzet

A 19. században összegyűlt sok kísérleti adat (főleg pl. az optikai spektroszkópiában) alapján – több durva közelítő modell megjelenése után – a *Bohr-modell* [2, 3] volt az első tényleg igényes, alapvető modell az atomra vonatkozólag. Nagy jelentőségű volt nemcsak az atomfizikában, de a kémiában is, és kiinduló pontul szolgált *Planck* hatáskvantumra vonatkozó eredményével [4] együtt a kvantummechanika számára.

Az az elmélet, amelyik az atomi jelenségek részleteit is megmagyarázza és kiszámíthatóvá teszi, a *kvantumelmélet* (*Heisenberg* [5], *Schrödinger* [6, 7], *Dirac* [8]). Ez

Nyitó előadás a „4th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems” (CEPAS'08) konferencián 2008. június 18-án Kolozsváron.

<sup>1</sup> A *Fizikai Szemle*ben szokásos hivatkozásszám tízszeresét a cikk és az alapjául szolgáló előadás áttekintő, a szakirodalmi eligazodást segítő célkitűzése indokolja. (*a Szerkesztő*)

## 1. táblázat

**A legutóbbi években publikált, alapvető kérdésekkel foglalkozó néhány atomfizikai eredmény**

<i>M. Schulz</i> és mtsai.: Négy-test atomi folyamatok háromdimenziós megjelenítése [18]
<i>A. Fubrer</i> és mtsai.: Szinglett-triplett átmenet aszimmetrikus kapufeszültség által behangolt kvantumgyűrűben [19]
<i>G.A. Bertoldi</i> és mtsai.: Atomi interferometrikus gravitációs gradiométer a newtoni gravitációs konstans meghatározására [20]
<i>Xiao-Juan Zheng</i> és mtsai.: Kvantumlogikai kapuk kétszintű ion esetében, egy nagyon speciális üregecsapdában, túl a Lamb-Dicke-határon [21]
<i>T. Coudreau</i> és mtsai.: Kvantummémória kivihetősége folytonos változókra csapdában lévő ionok esetén alapvető kritériumoktól a gyakorlati megvalósításig [22]
<i>A.B. Voitkiv</i> és mtsai.: Mozgó atom spontán sugárzásos bomlása [23]
<i>A.S. Dickinson</i> : Kvantumreflexiós modell ionizációs arány tényezőre hideg metastabil He-ütközésekben [24]
<i>L. Pezzé, A. Smerzi</i> : Sörétzaj alatti interferometrikus fázisérzékenység Be-ionok „Schrödinger-macska” állapotairól [25]
<i>R. Mir</i> és mtsai.: Kettős rés „which way” kísérlet a komplementaritás-bizonytalansági elv vitával kapcsolatban [26]
<i>O.Yu. Andreev</i> és mtsai.: A spektrumvonal-profil QED-elmélete és alkalmazása atomokra és ionokra [27]
<i>Z.S. Wang</i> és mtsai.: Kvantum-nonlokalitás által létrehozott geometrikus fázis [28]
<i>V. Loriot</i> és mtsai.: Molekuláris beállítódás tér nélküli körülmények között ionizációs valószínűség mérésére [29]

az elmélet nemcsak a természettudományok szempontjából alapvető jelentőségű, de szemléletváltással járt a modern filozófiában is, kihatóan az egész mai világ-felfogásunkra.

A következő megemlíthető jelentős atomfizikai eredmény a *Lamb-eltolódás* (a  $2P_{1/2}$  és a  $2S_{1/2}$  állapot felhasadása a H-atom esetében [9]), amely alapvető kísérleti eredmény a kvantumelektrodinamika szempontjából. Érdemes itt megemlíteni, hogy azóta több hasonló kísérletet végeztek el egy vagy néhány elektronnal rendelkező nehéz ionokkal (pl. *Liesen* [10]) vagy Rydberg-állapotok esetében (pl. *Goldman* és *Drake* [11]).

Továbbhaladva föltétlenül meg kell említenünk a *lézert* (*Kastler* [12], *Basov* és *Prokhorov* [13]), amelynek atomfizikai gyökereit és jelentőségét nehéz lenne túlértékelni.

Az *ESCA* (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) jelenségkört *K. Siegbahn* fedezte fel az 1960-as évek második felében (Siegbahn és mtsi. [14]), amelyért később Nobel-díjat kapott. Ennek eredményeképpen lehetővé vált az atomok kémiai állapotának, a kémiai kötéseknek az egyes atomokat körülvevő elektronszerkezetnek a megállapítása, főleg a felületeken.

Közeledve a jelenhez még egy eredményt szeretnék megemlíteni. 1974-ben egy elméleti számítás jelent meg (*Bouchiat* és *Bouchiat* [15]) *paritás-sértésről*

*nehéz atomokban* gyenge semleges kölcsönhatás következtében az atommag nukleonjai és az atom elektronjai között. Később ezt sikeres kísérletek bizonyították (áttekintő cikkek: *Bouchiat* és *Bouchiat* [16], *Ginges* és *Flambaum* [17]).

Jelenleg is folyamatosan jelennek meg olyan atomfizikai cikkek, amelyek alapvető eredményeket közölnek. Az 1. táblázatban összeállítottam egy „csokrot” az ilyen jellegű közleményekből, amelyek az utolsó néhány évben jelentek meg. Természetesen itt nem törekedtem, nem is törekedhettem teljességre, inkább csak érzékeltetni akartam az alapvető eredményeket tartalmazó közlemények jelenlétét az atomfizikában napjainkban is.

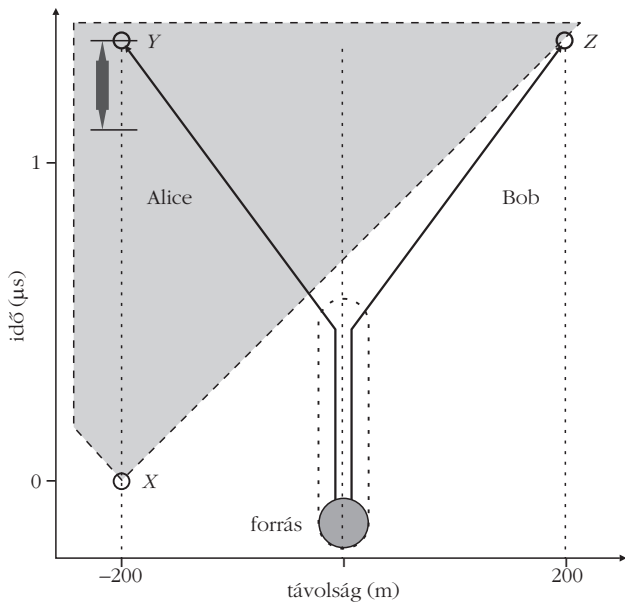
A továbbiakban három atomfizikában elért eredménnyel, jelenségcsoporttal szeretnék kissé részletesebben foglalkozni alapvető jelentőségük miatt, a fentebb elmondottak érzékeltetésére. Ezek: korreláció kapcsolt kvantumrendszerek között – népszerű néven kvantumteleportáció, Bose–Einstein-kondenzáció és bal-jobb aszimmetria külső s-héjon történő fotoionizációnál.

## Néhány szóban forgó fontos jelenség egy kissé részletesebben

*Kvantum-teleportáció.* Jól ismert, hogy a kvantummechanika megszületése óta folyik a vita formuláinak értelmezéséről. Az elmúlt évtizedek alatt ezzel kapcsolatban fontos számításokat és kísérleteket is végeztek. (Pl. *Bell* [30], *Freedman* és *Clauser* [31], *Aspect* és mtsi. [32], *Kwiat* és mtsi. [33]). Az 1. táblázatban is több ilyen cikket találhatunk. Egyébként különösen érdekes megemlíteni, hogy az utolsó néhány évben sikerült kísérletileg bebizonyítani, hogy a hullám–részecske komplementaritás ugyanabban a kísérletben egyidejűleg jelen van (*Afshar* [34], *Afshar* és mtsi. [35]).

Most azonban a teleportáció jelenségével kívánunk foglalkozni. Erre vonatkozólag Innsbruckban végeztek el egy fontos kísérletet tíz évvel ezelőtt (*Weibs* és mtsi. [36]). Bebizonyították, hogy erős korreláció van két kapcsolt kvantumrendszer között (két foton vagy részecske), amelyek korábban kapcsolatban voltak, ellentétben az EPR-feltételezéssel (*Einstein*, *Podolsky* és *Rosen* [37]). Az egyikén végzett méréssel meghatározzuk a másik állapotát, akármilyen messze is vannak egymástól. A kísérletben, amelynek vázlata az 1. ábrán látható, a két kísérletező, Alice és Bob, polarizált kapcsolt fotonokat használtak. A fontos detektorok 400 m távolságra voltak egymástól elhelyezve. A kísérlet alapvető jelentősége nyilvánvaló.

Az ezt követő években azután számos közlemény jelent meg, amelyek a szóban forgó kísérlet következményeivel foglalkoztak a „kvantuminformatikában” (kvantumkommunikáció, kvantumszámítógépek hálózata, kvantum-kriptográfia, kvantum-telefontávíró). Például *Nguyen* [38], *Gao* és mtsi. [39, 40], *Matsumoto* [41], *Ide* [42], *Hiskett* és mtsi. [43], *Deng* és mtsi. [44], *Furusawa* és *Takei* [45], *Adenier* és *Khbrennikov* [46], *Herbauts* és mtsi. [47].



1. ábra. A kísérleti elrendezés vázlata, amellyel Innsbruckban kimutatták a korrelációt kapcsolt (entangled) kvantum-rendszerek között [36]. Az Y-nál a foton polarizációs állapotára vonatkozó mérések meghatározzák a Z-nél lévő foton polarizációs állapotát, bár a köztük lévő távolság kizárja a közvetlen kommunikációt.

Legújabbban további gondosan megtervezett kísérleteket hajtottak végre a jelenségre vonatkozóan Bécsben (Gröblacher és mtsi. [48], Paterek és mtsi. [49]), valamint egy genfi–szingapúri együttműködés keretében (Branciard és mtsi. [50]) és sikerült kizárniuk az úgynevezett nemlokális realiztikus modelleknek egy szélesebb osztályát.

**Bose–Einstein-kondenzáció.** Amit Bose (Bose [51] és Einstein [52]) számításai előre jeleztek, azt Anderson és mtsi. [53], valamint Bradley és mtsi. [54] kísérletileg megvalósították. Arról van szó, hogy szomszédos atomok (bozonok) – pontosabban a szomszédos atomok kvantummechanikai hullámhosszai – olyan hosszúakká válnak elegendően alacsony hőmérsékleten, hogy felülmúlják az atomok méreteit, és egy makroszkopikus kvantummechanikai rendszer, a Bose–Einstein-kondenzátum jön létre. Így az egyes atomok elvesztik identitásukat. Ezeknek a kísérleteknek a végrehajtásához nemcsak igen alacsony hőmérsékletre (nagyságrendben 10–100 nanokelvin), de nagy sűrűségű anyagra van szükség, valamint lézeres és mágneses csapdát kell használni.

Bár a jelenséget több mint tíz évvel ezelőtt kísérletileg kimutatták, az utóbbi évtizedben is intenzív kutatás folyt ezen a területen. Kiemelhető eredmény például, hogy Bose–Einstein-kondenzátumot sikerült létrehozni fermionokra is (megfelelő molekulák esetében). A molekuláris Bose–Einstein-kondenzátumot egyszerre sikerült előállítani több laboratóriumban: Innsbruckban (Joachim és mtsi. [55]), Boulderben, Colorado (Greiner és mtsi. [56]) és a Massachusetts Institute of Technologyban (Regal és mtsi. [57]). Ez utóbbi esetben a fermionok ténylegesen nem kapcsolódtak molekulákká, hanem korreláltan együtt mozogtak. A konkrét kísérlet során a híg fermion izotóp-

pokból ( $^{40}\text{K}$ ) álló gázt egy optikai rezonanciás dipól-csapda sűrítette, megfelelő mágneses teret is alkalmazva, 300 nK hőmérséklet mellett.

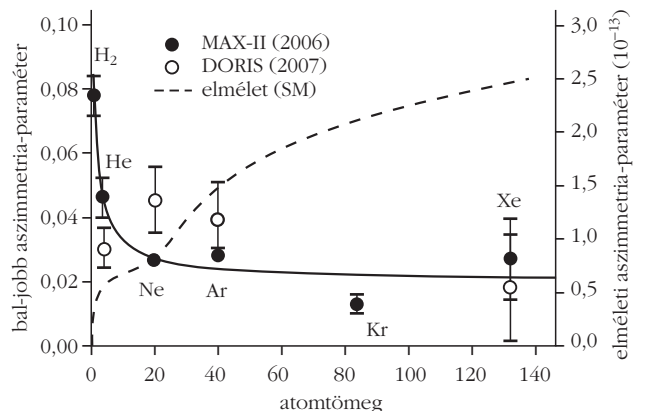
Ezek az alapvető eredmények fontosak a szuperfolyékonyság és szupravezetés jobb megértése szempontjából, de – és itt is mutatkozik az „eltéphetetlen” kapcsolat az alap- és alkalmazott kutatások között – figyelemreméltóak a gyakorlat számára előállítható, megfelelő szupravezető anyagok szempontjából is.

**Bal-jobb aszimmetria külső s-héjon történő fotoionizációnál.** Bal-jobb aszimmetriát mértek lineárisan polarizált szinkrotron sugárzás által külső s-héjból kiváltott fotoelektronok szögeloszlásában (Ricz és mtsi. [58], Kövér és mtsi. [59]). A méréseket különböző gáz céltárgyakon (He, Ne, Ar, Kr, Xe és  $\text{H}_2$ ) végezték egy speciálisan erre a célra készült elektron-spektrométerrel, amely egyidejűleg méri az elektronok szögeloszlását 0-tól  $360^\circ$ -ig (Ricz és mtsi. [60]). A 2. ábra a kísérletileg meghatározott aszimmetria-paraméter értékeit mutatja két különböző szinkrotronnál végzett mérések alapján, nevezetesen a MAX-II tárológyűrűnél (Lund) és a DORIS-III tárológyűrűnél (Hamburg) (Ricsóka és mtsi. [61]). Az elméleti görbét a nukleonok és az elektronok közti gyenge kölcsönhatás által okozott paritásértés feltételezésével számolták (a részleteket lásd: Ricz és mtsi. [58]).

A szóban forgó vizsgálat az első a fotoionizációban az elektronok szögeloszlására vonatkozólag mért bal-jobb aszimmetriát illetően. Az eredmények az elektromágneses kölcsönhatásban fellépő paritásértésre utalnak, ami a Standard modell keretében nem magyarázható.

Tekintettel az eredmény kiemelkedő jelentőségére, a szerzők igen alapos vizsgálatokat végeztek az esetleges kísérleti hibák ellenőrzésére, kiszűrésére. Így egyebek között a méréseket nem csak két különböző szinkrotronnyalában végezték el, de megismételték azokat úgy, hogy a spektrométert  $180^\circ$ -kal elfordították. A szögeloszlás mérését elvégezték továbbá egy

2. ábra. Kísérleti és elméleti bal-jobb aszimmetria-paraméterek az atomi tömeg függvényében a  $\text{H}_2$ -molekulára és a nemes gázokra He-től Xe-ig. A feketített köröket a Lundban (MAX-II), a fehérén hagyott köröket a Hamburgban (DORIS-III) végzett mérések alapján határozták meg. A fekete vonalat csak azért húzták meg, hogy a szemeltesse. A szaggatott vonallal megrajzolt elméleti görbét a nukleonok és az elektronok közötti gyenge kölcsönhatás alapján számították ki [61].



másik spektrométerrel is. Mindezen körülmények között a vizsgálatok eredményei a lényegét tekintve változatlanok maradtak. Mivel az eredménynek igen nagy a jelentősége a fizika alapjai szempontjából, nagyon is indokolt az értelmezésükre vonatkozó további kutatás. Egyébként teljesen valószínűtlen, hogy az eredményt a szinkrotronsugárzás időszerkezetére vonatkozó feltevessel lehessen magyarázni.

Meg kell jegyeznünk, hogy mind elméleti, mind kísérleti vonalon folynak vizsgálatok a jelenlegi térelmélet tesztelésére (lásd pl. Horváth [62], Leggett [63]). Ebbe a sorba illeszkedik az a konferenciasorozat, amelyet az Indianai Egyetemen háromévenként tartanak a Lorentz- és CPT-sértésre vonatkozó elméletekről és kísérletekről. A legutóbbit 2007. augusztus 8. és 11. között tartották (Russel [64]).



Őszintén remélem, hogy a fentiekkel sikerült bemutatnom az atomfizika jelentőségét a természetre, a természet jelenségeire vonatkozó alapvető (fundamentális) ismereteink szempontjából, és pedig nemcsak a múltra és jelenre, de minden jel szerint a jövőre vonatkozóan is.

#### Irodalom

1. D. Berényi, *Rad. Phys. Chem.* 76 (2007) 367.
2. N. Bohr, *Phil. Mag.* 26 (1913) 1.
3. N. Bohr, *Phil. Mag.* 26 (1913) 476.
4. M. Planck, *Annalen der Physik* 4 (1901) 553.
5. W. Heisenberg, *Zeits. f. Phys.* 33 (1925) 879.
6. E. Schrödinger, *Ann. d. Phys.* 79 (1926) 361.
7. E. Schrödinger, *Ann. d. Phys.* 79 (1926) 489.
8. P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. A126* (1930) 360.
9. W.E. Lamb, R.C. Retherford, *Phys. Rev.* 72 (1947) 241.
10. D. Liesen: *X-Ray and Inner-Shell Processes*. Am. Inst. of Phys., New York, 1997.
11. S.P. Goldman, G.W.F. Drake, *Phys. Rev Lett.* 68 (1992) 1683.
12. A.J. Kastler, *J. Phys. Radium* 11 (1950) 255.
13. N.G. Basov, A.M. Prokhorov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 27 (1954) 431.
14. K. Siegbahn és mtsai.: *Atomic Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy*. Almqvist and Wiksell, Uppsala, 1967.
15. M.A. Bouchiat, C.C. Bouchiat, *Phys. Lett.* 48B (1974) 111.
16. M.A. Bouchiat, C.C. Bouchiat, *Rep. Prog. Phys.* 60 (1997) 1351.
17. J.S.M. Ginges, V.V. Flambaum, *Phys. Reports* 397 (2004) 63.
18. M. Schulz és mtsai., *Nature* 422 (2003) 48.
19. A. Führer és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 20 (2003) 206802-1.
20. G.A. Bertoldi és mtsai., *Eur. Phys. J. D40* (2006) 271.
21. Xiao-Juan Zheng és mtsai., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40 (2007) 507.
22. T. Coudreau és mtsai., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40 (2007) 413.
23. A.B. Voitkiv és mtsai., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40 (2007) 3377.
24. A.S. Dickinson, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40 (2007) 237.
25. L. Pezzé, A. Smerzi, *EPL-A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics* 78 (2007) 3004.
26. R. Mir és mtsai., *New J. of Phys.* 9 (2007) 287.
27. O.Yu. Andreev és mtsai., *Phys. Reports* 455 (2008) 135.
28. Z.S. Wang és mtsai., *Phys. Lett.* A372 (2008) 775.
29. V. Lorient és mtsai., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 41 (2008) 015604.
30. J.S. Bell, *Physics* 1 (1965) 195.
31. S.J. Freedman, J.F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.* 28 (1972) 938.
32. A. Aspect és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 1804.
33. P.G. Kwiat és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 4337.
34. S.S. Afshar, *Proc. SPIE* 5866 (2005) 229.
35. S.S. Afshar és mtsai., *Fund. of Phys.* 37 (2007) 295.
36. G. Weihs és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 5039.
37. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* 47 (1935) 777.
38. B.A. Nguyen, *Phys. Lett.* A350 (2006) 174.
39. F. Gao és mtsai., *Phys. Lett.* A360 (2007) 748.
40. F. Gao és mtsai., *Phys. Lett.* A365 (2007) 386.
41. K. Matsumoto, *Phys. Lett.* A350 (2006) 179.
42. T. Ide, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 164 (2006) 176.
43. P.A. Hiskett és mtsai., *New J. of Phys.* 8 (2006) 193.
44. F.-G. Deng és mtsai. *Phys. Lett.* A359 (2006) 359.
45. A. Furusawa, N. Takei, *Phys. Report* 443 (2007) 97.
46. G. Adenier, A.Y. Krennikov, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40 (2007) 131.
47. I.M. Herbauts és mtsai., *Eur. Phys. J. D46* (2008) 395.
48. S. Gröblacher és mtsai., *Nature* 446 (2007) 871.
49. T. Paterek és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 92 (2007) 210406.
50. C. Branciard és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 211407.
51. S.N. Bose, *Zeits. f. Phys.* 26 (1924) 178.
52. A. Einstein, *Sitz. Ber. Preuss. Acad. Wiss. (Berlin)* 1 (1925) 3.
53. M.H. Anderson és mtsai., *Science* 269 (1995) 198.
54. C. Bradley és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 1687.
55. S. Joachim és mtsai., *Science* 302 (2003) 2101.
56. M. Greiner és mtsai., *Nature* 426 (2003) 537.
57. C.A. Regal és mtsai., *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 04403.
58. S. Ricz és mtsai., *New J. of Phys.* 9 (2007) 274.
59. Á. Kövér, és mtsai., Proc. 3rd Japan–Hungary Joint Seminar on Physics in Modern Science and Technology, Oct. 8–12, 2007, Debrecen–Szeged–Budapest, Hungary. Published by Int. Inst. for Adv. Studies, Kyoto, Japan, 2008. p. 41.
60. S. Ricz és mtsai., *Phys. Rev. A65* (2002) 042707.
61. T. Ricsóka és mtsai., (2008) közlés alatt
62. D. Horváth, Proc. 3rd Japan–Hungary Joint Seminar on Physics in Modern Science and Technology, Oct. 8–12, 2007, Debrecen–Szeged–Budapest, Hungary. Published by Int. Inst. for Adv. Studies, Kyoto, Japan, 2008. p. 173.
63. A.J. Leggett, *Rep. Prog. Phys.* 71 (2008) 022001.
64. N. Russel, *CERN Courier* (Jan/Febr. 2008) 23.

## VÉLEMÉNYEK

# TUDÁSALAPÚ TÁRSADALOM?

Tizenöt éve e sorok írója egy vizsgálatot ismertetett a *Természet Világa* hasábjain [1], amely arra kereste a választ egy nemzetközi felmérés nyomán, hogy fiataljaink között milyen mértékben hódítanak az irracionális és áltudományos nézetek, összehasonlítva azt egy, az

Bencze Gyula  
KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet

új-zélandi fiatalok közötti felmérés eredményeivel. A hivatkozott cikkből idézve: „Bár Új-Zéland mind földrajzilag, mind pedig kultúráját tekintve igen messze van Magyarországtól, a felmérés eredményei alkalmas mércét jelenthetnek számunkra, még akkor is, ha ez a távoli



ország egyáltalán nem ambicionálja az Európa-házba való bekerülést. Az értékelést végzők véleménye szerint a tanulók gondolkodása dogmatikussá válik mire a középiskolába kerülnek. Ha ez a dogmatizmus összekapcsolódik áltudományos hiedelmek rendszerével, amelynek kiépítésében a tömegtájékoztató előszeretettel közreműködik, valóban helye van az aggodalomnak...

Az összehasonlítás azt mutatja, hogy a »parajelenségek«, illetve áltudományok minden olyan műfajában, amelyet már »importáltunk«, fiataljaink hiszékenyebbek, mint új-zélandi kortársaik. Ami a babonára vonatkozó kérdéseket illeti, a válaszokból főleg a tanulók otthoni környezetének hatására, valamint a népi hagyományok sajátosságaira lehet következtetni. Az angolszász hitvilágban jóval nagyobb szerep jut a kísérteteknek és a kísértetjárásnak. Nálunk a fekete macska babonája, valamint a fán való lekopogás a legelterjedtebb. Örömmel állapítható meg, hogy – hála Könyves Kálmán királyunk felvilágosult tevékenységének – a boszorkányhit elhanyagolható! Ezzel szemben tükröt törni nem ajánlatos, és újabban a talizmán hordása is hasznos lehet – egyes fiataljaink hite szerint.”

A vizsgálat eredményei arra utaltak, hogy a médiuumoknak az áltudományos nézeteket kritikátlanul népszerűsítő tevékenysége is felelős a helyzet kialakulásáért: „A felmérés adatait nem lehet vitatni, nyitott kérdés azonban az eredmények interpretálása. A fentiekben ismertetett hipotézis, amely a média felelősségére utal, további megerősítést igényel. Feltétlenül szükség van például gyakorló pedagógus, pszichológus, esetleg szociológus véleményének kikérésére is. A szerző, mint fizikus és megrögzött szkeptikus mindenestre úgy érzi, a helyzet aggasztó. Befejezésül csupán egy megjegyzés: egy demokráciában önmagunk butítása magánügy, mások (pl. az ifjúság) butítása azonban már közügy! Országunk jövője szempontjából fontos arra is tekintettel lenni, hogy minden nemzetnek olyan lesz az ifjúsága, amilyenek azt neveli!”

A vizsgálat konklúzióját vitatta *Csákány Antalné* [2], aki szerint a pedagógusokat és az oktatást is felelősség terheli: „Ki más tehetne a fiatalok világról alkotott nézeteinek minőségéért többet, mint éppen a természettudományokat oktató tanár? Hol kellene és lehetne a téveszméktől megszabadulni és valódi tudást szerezni, ha nem az iskolában?!”

Ha a jelenlegi tananyag akár felépítése, akár tömörsége, akár elvontsága vagy bármi egyéb miatt nem eredményezi a kívánt célok elérését, akkor más szempontú válogatásával, másképpen megírt tankönyvekkel jobb eredményt lehetne elérni. Úgy gondolom, a gyerekek számára felfogható tények, véleményük rendszeres meghallgatása, az eltérő vélemények ütköztetése és az érvekkel való meggyőzés biztosan jobb eredményekre vezetne. (A mai tananyagmennyiség mellett mindezekre nem sok idő jut.)

Ennek a vizsgálatnak a fényében szembe kell nézni a kérdéssel: jó úton jár-e az iskolai természettudományos oktatás? Mi, tanárok nem tudnánk-e ezen a helyzeten változtatni?

Én úgy gondolom, feltétlenül kellene.”

Nos, az eltelt 15 év elegendően hosszú idő egy társadalom életében ahhoz, hogy fel lehessen ismerni a főbb eszméáramlatokat és azonosítani a domináns trendeket. A látélet sajnos elszomorító: az irracionálizmus térhódítása tovább folytatódott, az egyik leglátványosabb esemény e téren a parafenomén *Uri Geller* megjelenése volt az egyik kereskedelmi TV-csatornán, amely nagy sikerként könyvelte el azt a látványos showműsort, amelyben Geller az utódját kereste a hazai jelentkezők között. Ebben a műsorban jelent meg hazánkban először a „tudományos mentalizmus” fogalma, amely egyrészt alapjaiban megosztotta a hazai bűvészközösséget, másrészt hozzájárult ahhoz is, hogy az egyik neves hazai bűvésznünk tragikusan neveltségessé tegye magát mind a szakma, mind pedig tisztelői előtt.

Az irracionális terén azonban, akárcsak a lejtőn, nehéz megállni. Nem véletlen, hogy egy szomorú esemény kapcsán mostanában derült fény az élsportolóink által használt „teljesen legális” teljesítményfokozó „nanotapasztra”, sportvezetőink jótékony hatású „titániumnyakláncára” – és mindez persze az adófizetők pénzén, feltehetően a hazai tudományos körök tanácsainak kikérése nélkül! Az sem meglepetés már, ha a kormányhivatalokban a jó munkahelyi légkört jól megfizetett feng-shui szakértők hivatottak létrehozni. Nincs messze már az az idő sem, amikor politikusaink intelligenciájának növelését nanotechnológiát alkalmazó mágneses végbélkúp fogja megvalósítani – közpénzen! Az agykontrollról pedig ne is beszéljünk, bár nagy hátránya, hogy csak „hozott anyagból” tudnak dolgozni!

Az oktatás terén is drámai események történtek. Az utóbbi időben szinte szokássá vált verni a pedagógusokat az iskolákban, a látványosabb eseteket az interneten is nyomon követhette a nagyérdemű! Sajnos az eseményekre nem reagált a szakma egyértelműen, és nem sorakozott fel az eseményeket elszenvedők mögött. Egyes felelős vezetők szerint a pedagógusnak „megfelelően kellett volna kezelni az eseményeket”. A szót rövidre fogva, a jövőben csak az menjen pedagógusnak, akinek van büntetés-végrehajtási (börtönőri) alapképzettsége!

Hazai tudományunk fellegvárában, az Akadémián sem egyszerű a helyzet. A 2008. évi közgyűlés beszámolójában bukkanhatunk az alábbi sorokra [3]: „*Nagy Károly* rendes tag ötvennyolc éve tanít az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, a Természettudományi Karon. Ilyen alacsony színvonalat, mint ma, még sohasem tapasztalt. A tanárjelöltek nem tudnak értelmes magyar mondatokat mondani. A problémát már többször felvetette, a miniszterek nem reagáltak.”

A helyzetre leginkább jellemző a tudós társadalom következő reakciója [3]: „*Marosi Ernő* rendes tag, alelnök, Nagy Károly hozzászólására reagálva kijelentette, hogy esztelen vállalkozás teletönni az iskolákat az élettelen természettudományok képviselőivel anélkül, hogy gondot fordítanánk a humán műveltség alapjaira. A közös feladat az Akadémia 1825–28-ban megfogalmazott alapszabályainak első mondata: a tudományok magyar nyelven való művelése.”

Hétköznapi magyarra lefordítva: ha valaki hülye a matematika és fizika alapjainak elsajátításához, akkor sürgősen pótolja az elmulasztott virágénekeket!

A helyzet „egyre fokozódik”, amit az is mutat, hogy a *Magyar Nemzet* 2008. július 5-i száma már felteszi a kérdést: megszűnik a matematika érettségi? A napilap szerint ugyanis elképzelhető, hogy a jövőben a matematika nem lesz kötelező vizsgatárgy, ehelyett a diákok választhatnának, hogy matekból vagy fizikából, kémiából, illetve biológiából érettségiznek [4]. A természettudományos képzésekre ugyanis idén annyira kevesen jelentkeztek, hogy az egyetemek még az ingyenes férőhelyeket sem tudták feltölteni; a tavalyinál csaknem negyedével kevesebb diákot vettek fel a kurzusokra – jelentette a *Magyar Nemzet*.

Szerencsére még nincs minden veszve, ugyanis *Pálinkás József* akadémikus, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke szerint a matematika a logikus gondolkodás alapja, és a mindennapi életben elkerülhetetlen. A matek érettségi választhatóvá tételének ötlete – szerinte – abszurdabb, mintha a magyart akaróknak eltörölni. Az MTA elnöke a kötelező matek érettségi megtartása mellett tenné kötelezővé a természettudományos tárgyból tett vizsgát. Javaslatát az Országgyűlés Tudományos és Oktatási Bizottsága is támogatta tavasszal.

A minisztérium államtitkára, *Arató Gergely* államtitkár ezzel szemben örülne a változásnak – ő olyan ter-

mészettudományos összefoglaló tantárgyat látna ideálisnak, ami a fizikát, a biológiát, a kémiát és a földrajzot is összefoglalná [5].

Ehhez a magunk részéről csak azt az ötletet tudnánk szerényen hozzátenni, hogy később ezt össze lehetne vonni a szépségversenyen való szereplés médiatudományával, a kommunikációval és a „színesfém-logisztika” alapjainak megismertetésével, hiszen fiataljaink között bizonyítottan ma erre van a legnagyobb igény!

A helyzet a fizika terminológiájával élve kissé kaotikus, erre találták ki egyes szellemi vezetők azt a takaros kifejezést, hogy „tudáslapú társadalmat építünk”. Mindenesetre nem mindennapi kaland lesz élni abban a társadalomban, ahol az energetika (atomenergetika), valamint a műszaki fejlődés problémáinak megoldásában jól képzett parafenoméneknek, kommunikáció szakon végzett széplelkeknek, valamint az asztrológia és a mesterséges unintelligencia szakértőinek fog jutni a meghatározó szerep!

#### Irodalom

1. Bencze Gyula: Valahol, és Európában? *Természet Világa* (1993/4) 186–187.
2. Csákány Antalné: Célok és eredmények. *Természet Világa* (1993/4)
3. Beszámoló a Magyar Tudományos Akadémia 178. Közgyűléséről, 2008. május 5–6. *Magyar Tudomány* (2008/06) 740.
4. [http://atv.hu/videotar/2008\\_aug\\_lottek\\_a\\_matematika\\_ertseginek\\_.html](http://atv.hu/videotar/2008_aug_lottek_a_matematika_ertseginek_.html)
5. [www.mno.hu](http://www.mno.hu)

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# KÉTNAPOS »FIZIKA-SHOW« AZ ISKOLÁBAN

Jaloveczki József

Szent László Általános Művelődési Központ, Baja

„Csak az az ismeret érdemes a tudás névre, aminek alkalmazásához is értünk.

A tudományban nincsenek nehéz és könnyű dolgok, csak megértettek és meg nem értettek vannak.”

*Öveges József*

A kétszintű fizikaérettségi követelményei közé bekerült a kísérletezés is. Sok középiskolában nincs mód tanulói kísérletek végzésére, de még a demonstrációs kísérletek lehetősége is igen korlátozott. Az egyetemek évek óta jelzik, hogy a belépő hallgatók fizika-előképzettségének színvonala csökken. Több szakirányú felsőoktatási intézményben a fizika csak a választható tárgyak között szerepel a felvételi követelményekben. Ezek a tények vitathatatlan kapcsolatban állnak a középiskolai fizika óraszámának és a tárgy presztízsének csökkenésével.

A középiskolai fizikával kapcsolatos felmérések ismeretében kijelenthetjük, hogy a fizika a középisko-

labán valamiféle mumussá nőtte ki magát. Ez annál inkább így lesz, minél kevesebb idő, energia és pénz jut kísérletezésre, és minél kevesebb lehetőség van a tanulók aktivizálására [1].

## A bemutató gondolata

1999 őszén alakult meg iskolánkban a Mandelbrot Tudományos Diákkör. Fő célkitűzései többek között a nemlineáris jelenségek vizsgálata, kaosz kutatás. Munkánkhoz hamarosan találtunk egy kiváló mentort *Tél*

*Tamás* (ELTE, Elméleti Fizika Tanszék) személyében. Ő és munkatársa (*Gruiz Márton*) előadások tartásával is segített munkánk népszerűsítésében. A diákkör és a mellette működő szakkör létszáma évente növekedett. A katolikus iskolák országos versenyében a Károly Ireneusz Fizika Versenyen 1999 óta minden évben részt vettünk. A verseny célkitűzései közé tartozik a tehetséges, szorgalmas és a fizika iránt érdeklődő diákok motiválása, valamint kiválasztása országos és nemzetközi versenyekre. A verseny alapvetően jelenség- és kísérletcentrikus [2].

Az otthoni fordulókra adott feladatok meghatározták a fizikaszakkör negyedéves munkáját. 2006-ban egy teljes 8. osztály bevonásával végeztünk méréseket, kísérleteket. A tanulók nagyon élvezték a közös munkát, a dolgozat I. díjas lett. Ezenkívül minden évben a verseny kísérleti fordulójára általunk választott és általunk fejlesztett kísérletekkel készültünk. A versenyen tartott bemutatók hangulata a fizika szeretetét tükrözte. Bemutatott kísérleteinket számos esetben díjazták közönségdíjjal is.

Hamarosan felvetődött egy olyan bemutató gondolata, amelyen a diáktársakkal, tanárokkal és a nagyközönséggel is megismertethetnénk ezeket a kísérleteket. Először a 2001. évben rendeztünk bemutatót, körülbelül 20 kísérlettel egy teremben. Azon a délutánon kiderült, hogy a fizika érdeklői az embereket. Óriási tömeg volt, sokan tudakolták, hogy mikor lesz a következő. A rákövetkező hat évben a szakkörös és a diákkörös tanulók számtalan sikert értek el különböző versenyeken. Diákkörünk-ből 2 tanuló megnyert egy hazai pályázatot a nemlineáris jelenségek tárgyköréből (SZTE, 2005). Szakköri tagjaink közül 2 tanuló vett részt az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyén (IYPT). Mindketten hozzájárultak ahhoz, hogy a magyar csapat eredményesen szerepeljen. A sikerhez társult a kísérletező munkával járó jó hangulat, ami a foglalkozásokat jellemezte. Ekkorra érett be egy újabb fizikabemutató gondolata.

## Előkészületek

A kísérletek kiválasztása, megtervezése és kipróbálása elsősorban a délutáni fizika szakköri foglalkozásokon történt. A versenyeken bemutatott kísérletek mellett helyt kaptak a hagyományos, de érdeklődésre számot tartó jelenség bemutatók is [3–6]. A cél végső soron a jórészt laikusokból álló nagyközönség szórakoztatása, érdeklődésének felkeltése volt. Látványos műsort terveztünk, helyi „Csodák Palotá”-ját.

A bemutatóra körülbelül 45 diák jelentkezett. Kor szerinti megoszlásban volt ott 8., 9. és 11. évfolyamos is. Több volt a lány, mint a fiú. A szakkörösök és a Mandelbrot Diákkör tagjai betanították jellemzően humán érdeklődésű társaiknak a kísérleteket. Saját bevállalásuk szerint a próbák alatt egyre jobban megtetszett nekik a fizika, és a bemutatón nagyon jól érezték magukat.

Névre szóló kitűzőket és plakátokat is készítettünk a bemutatóra. A plakátokat kiraktuk városszerte, meghívókat küldtünk a város és a környék általános- és középiskoláinak. A város nyílt weblapján is hirdettük a bemutatót, amelynek idejét 2007. március 13–14-re tűztük ki. A próbák és előkészületek gyakorlatilag november óta folytak. Vendégeknyvról is gondoskodtunk a vélemények bejegyzéséhez. A bemutató két napján déltől délután 4 óráig tartottak a kísérletek.

## A „fizika-show”

Mindenki izgatottan várta a vendégeket. A bemutató első napján már 12 óra előtt gyülekeztek. A megnyitás után tele lett az előadóterem, szinte mozdulni sem lehetett. A bemutató diákok, kezdeti idegességükön túlesve, szenvedélyesen magyarázták kísérleteiket. A bemutatókkal járó alapzajhoz természetes háttérrel jelentett a számítógépekről felhangzó zene, amely a monitorokon látható képekhez, videókhöz kapcsolódott.

A nagytermet körbejárók a kisteremben folytathatták a nézelődést. Itt modern fizikai elemeket is tartalmazó kísérleteket láthattak. Elektronika és atomfizika tárgykörben *Pusztai Máté*, 8. osztályos fizika szakkörös tanuló remekelt, míg a relativitáselmülethez is kapcsolódóan *Béni Kornél*, 9. osztályos gimnazista tartott színvonalas előadást. A bemutató tanulók nagyon ötletesen, öntevékenyen pótolták az ideiglenes hiányokat (lufi, mosogatószer, gyufa stb.). A második napon a helyi TV is megjelent, felvételeket és riportot készített nemcsak a bemutatót szervező tanárral, hanem a bemutató és látogató diákokkal is. A felvett riport később a helyi híradóban több alkalommal is látható volt. A visszajelzések sikerről tanúskodnak, amint az a vendégeknyvi bejegyzésekből és a személyes beszélgetésekből is kitűnt.

A bemutató első napja 4–5 órás kemény munkával lezárult, és a diákok várakozva tekintettek a második nap elé. A második napon sem csökkent a zsúfoltság. Az ÁMK óvodásai is eljöttek, és nagyon élvezték a bemutatót. A kísérleteket bemutató tanulók könnyen megtalálták a hangot az ovisokkal, játszottak és ajándékoztak (pl. lufikat), és igyekeztek a megfelelő szinten magyarázni a kísérleteiket. A kicsik kikerelkedett szemmel nézték a kísérleteket, néhol megilletődtek (pl. celofánrobbanás...), de általában igazi csodavárással szemlélődtek. Számos – nem fizikaszakos – kolléga vállalta be utóbb, hogy nagyon tetszett a „show”.

A két napon 50 kísérletet lehetett megtekinteni, és meghallgatni a hozzájuk kapcsolódó hosszabb-rövidebb magyarázatokat. A bemutató tanulók munkáját jellemzi, hogy az előkészületeken túl, mindkét napon, négy órán keresztül, kisebb pihenőkkel újra és újra örömmel mutatták be kísérleteiket. Láthatóan élvezték is, hogy ők most „fizikát csinálnak”, és tanuló társaiknak, tanáraiknak, valamint a vendégeknek magyarázhatnak. A két nap eseményeiről látható fényképes ízelítő a hátsó borítón.

## Emlékkönyvünk...

„Tetszett főleg a buborékok. Az volt a baj, hogy egy kicsit sokan voltunk.”

„Színvonalas előadás volt, sok újat megtudtam.”

„Hangos volt, érdekesnek és izgalmasnak találtam.”

„Varázslatos, mégis egyszerű és logikus. Nem lehet megenni.”

„Érdekes, egyszerű volt. Tök jó! ☺ kipróbálok!”

„Tök jó volt, bár lehetett volna több kísérlet!

Nekem a 200 Ft-os tetszett a legjobban! ☺”

„Fantasztikus élmény, lézerfény, gumiasztal stb. Gratulálunk!”

„Nagyon érdekes volt! Köszönjük a kis Einsteinoknak!”

„A Szt. László Oviból jöttünk – de jól tettük... 30 gyerek 4 felnőtt és néhány szülő kísért el bennünket. Nagyon készültünk és vártuk a »fizikaórát« – érdekes volt. A gyerekeinket lekötötte a szappanbuborék, örömmel fogták be fülüket a »robbanás« alatt. Még a lufit is ki lehetett lyukasztani, anélkül, hogy kidurranat volna! Örülök hogy eljöttünk, több hasonló délutánt kívánok magunknak. Tanár Úr! Gyerekek! Köszönjük. Kornél gratulálok.”

„Nagyon tetszett! Buborék 4ever. Főleg az volt a legjobb, amikor megráztak a srácok + a kistermi előadások.”

„Szerintem csodás volt az egész. Fantasztikus kísérletek. Logikus és abszurd jelenségek egyaránt. Remélem minden évben megrendezik. ☺”

„Nagyon köszönjük a Show-t! Minden klassz volt! Örülök, hogy ilyen lelkes diákok járnak ide!”

## Záró gondolatok

Eredeti célkitűzésünk a fizika népszerűsítése volt iskolán belül és kívül. Úgy érezzük, hogy sokak számára „kézzelfoghatóbb” lett ez a tudomány, ami különösen fontos manapság, amikor lépten-nyomon halljuk közismert emberektől is, hogy mennyire nem szeretnék annak idején. Sok ember meg sem kísérel megismerni a jelenségek valódi okát, helyette a misztikumok és áltudományok világába menekül.

A bemutató elmélyítette az aktívan közreműködő diákok ismereteit is, kedvet csinált a kísérletek elvégzéséhez, fejlesztette előadó-képességüket. Minden résztvevő jól érezte magát ezen a két délutánon. Igazi fizika-show volt. Örömmel és büszkeséggel tölt el, hogy ez a mi iskolánkban történt 2007 tavaszán, valamint megszervezhettem, és részese lehettem.

A bemutatóról készült további képek és videók megnézhetők a [www.fizikashow.extra.hu](http://www.fizikashow.extra.hu) oldalon, ugyanitt a kísérletek leírása is olvasható. További kérdéseket, véleményeket a [jalo@freemail.hu](mailto:jalo@freemail.hu) e-mail címen szívesen fogadok.

### Irodalom

1. Tóth A.: A kétszintű érettségi és az új felvételi rendszer egy műegyetemi oktató szemével. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 207.
2. <http://www.ovegesegylet.hu/karolyireneusz.htm>
3. Juhász A.: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 1.* Arkhimédész Bt.–Typotex Kiadó, Budapest, 1996.
4. Juhász A.: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 2.* Arkhimédész Bt.–Typotex Kiadó, Budapest, 1996.
5. Juhász A.: *Fizikai kísérletek gyűjteménye 3.* Arkhimédész Bt.–Typotex Kiadó, Budapest, 1996.
6. C. Siddons: *Fizikai kísérletek.* Novotrade kiadó, Sulikom, 1991.

# FIZIKÁZZUNK EGYSZERŰEN, SZÁMÍTÓGÉPPSEL

Eichhardt Iván, Jaloveczki József

Mandelbrot Tudományos Diákkör  
Szent László ÁMK, Baja

Közismert, hogy a diákok szeretnek számítógéppel játszani. Szerencsére ma már sok gyereknek van otthon is gépe, de akiknek nincs, azok is hozzáférhetnek az iskolában. Az is közismert, hogy többségük nemigen szereti a fizikát, matekot. E tantárgyak megkedveltetéséhez szeretnénk a PC népszerűségét felhasználni. Szinte játékosan lehet Newton törvényeit, a mozgások leírását megtanulni, emellett számos függvényábrázolást és a függvények tulajdonságait megismerni. Programunk egy pontos test egy- és/vagy kétdimenziós mozgását modellezi. Az Excel-program a megadott paraméterek alapján  $dt$  időközönként számolja a test helyét, sebességét, gyorsulás adatait, majd ezeket ábrázolja az idő függvényében. Kétdimenziós mozgásnál az  $a$  gyorsulást, a  $v$  sebességet és az  $r$  helyet az  $x$  és  $y$  komponensekből számolja Pitagorasz tételével.

Érdekes lehet a testre ható eredő erő hely szerinti változása, amit szintén megtekinthetünk a program futása során. Kétdimenziós mozgásnál nagyon szemléletes a pályagörbe ( $x$ - $y$  sík) kirajzolása. Megnézhetjük a fázissíkbeli ábrát is, ami nem más, mint a hely ( $x$ ,  $y$  vagy  $r$ ) – sebesség ( $v$ ) grafikon. Az ilyen ábrázolást főleg a periodikus mozgásoknál és a gerjesztett, súrlódásos eseteknél érdemes tanulmányozni. Utóbbiaknál a mozgás kaotikusságát is el lehet érni, ami jól látszik azon, ahogyan a test mozgása alakul a kezdeti feltételek kis változásaira.

Néhány kipróbálásra érdemes esetet mutatunk be az egészen egyszerűtől a bonyolult erőtvörnyig. Az egyes eseteken belül számtalan kezdeti paraméterértékkel lehet játszani. A játékkal jól fejleszthető a dinamikai szemlélet, fejleszti a matematikai és informatikai kompetenciákat is. A program jól használható a

középiskolai 9. évfolyamos fizikaoktatásban az erő-törvények tanításánál, érettségire előkészítő órákon, szakkörökön és azon kívül is bármikor.

A programban szereplő általános erő-törvényt egydimenziós esetben skalárként, illetve kétdimenziós esetben már vektorként kezelve az alábbiakban foglalkozhatunk össze:

$$F = F_0 - D \cdot l - \mu \cdot m \cdot g - k \cdot v - C \cdot v^2 + A \cdot \cos(\omega t + \varphi).$$

Tehát a testre ható  $F$  erő állhat egy  $F_0$  állandó irányú és nagyságú erőből, egy  $Dl$  alakú rúgóerő típusú erőből, ahol  $D$  a rugóállandó,  $l$  pedig a rugó megnyúlása a nyugalmi hosszához képest, továbbá disszipatív tagokból, mint a  $\mu mg$  súrlódási erő ( $\mu$  a súrlódási együttható,  $m$  a test tömege,  $g$  a nehézségi gyorsulás), és a sebességtől függő közegellenállási erőkből (kis sebességeknél ez lineáris, együtthatóját  $k$ -val jelöltük, míg nagy sebességeknél  $v^2$ -tel arányos, együtthatóját  $C$ -vel jelöltük), befejezéseképpen még tartalmaz egy periodikus kényszererőtagot (amplitúdója  $A$ , körfrekvenciája  $\omega$  és relatív fázisa  $\varphi$ ).

A program futtatásához meg kell adni a kezdőadatokat, a beviteli mezőben lévő cellák tartalma:

E5: időköz

G5: a választott időközhez kiszámolja, hogy az intervallumban milyen a sebességnövekedés (%-ban) és az összes érték közül a maximálist írja ki. Célszerű úgy választani időközt, hogy ez az érték az 5%-ot ne haladja meg. A közelítés akkor még jónak vehető.

K5: tömeg

B6: Az  $x$  irányú periodikus erő körfrekvenciája

B7: Az  $x$  irányú periodikus erő kezdőfázisa

B8: Az  $x$  irányú periodikus erő amplitúdója

D6; D7; D8: a fenti háromnak felel meg csak az  $y$  irányra

F6; H6: a sebesség négyzetével arányos közegellenállás tényezője ( $y$  és  $x$  irányra)

E8; H8: a sebességgel egyenesen arányos közegellenállás tényezője ( $y$  és  $x$  irányra)

E7; H7: A testre ható állandó erő ( $y$  és  $x$  irányú komponensek)

L6; N6: a test kezdeti helykoordinátái ( $y_0$  és  $x_0$ )

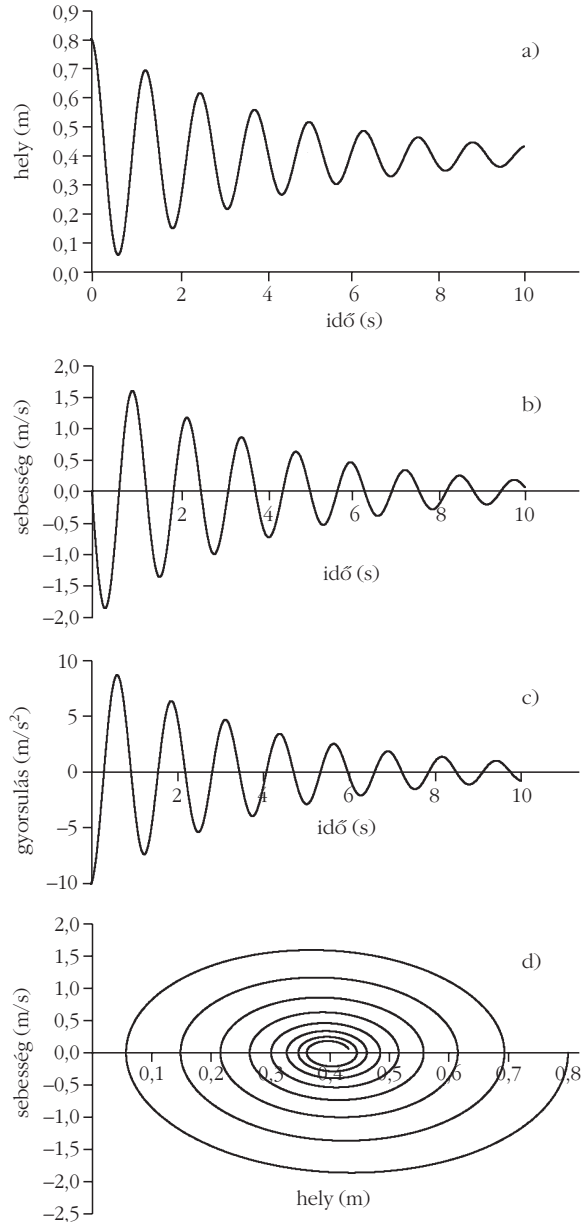
L8; N8: a testre ható súrlódási erő (vízszintes felületen, gravitációs mezőben) felületi tényezői ( $y$  és  $x$  irányokban)

Q5; Q10: a test kezdeti sebessége ( $x$  és  $y$  irányokban)

P6; P11: a testre ható rugalmas erő direkciós ereje ( $x$  és  $y$  irányokra)

Q8; Q13: a testhez kapcsolt rugó nyújtatlan hossza ( $x$  és  $y$  irányokban)

A program a szükséges paraméterek (tömeg, súrlódás, közegellenállási tényezők stb.) bevitele után a kezdeti hely- és sebességadatokból az erő-törvény alapján kiszámolja az erő ( $x$ ,  $y$ ) komponenseit (L19; M19). Ezekből (a tömeg figyelembe vételével) a gyorsulásokat (C19; D19). Ezeket az adott intervallumban állandónak tekintjük. A gyorsulások ismeretében meghatározza az új sebességeket ( $v_0 + a\Delta t$  alapján,



1. ábra. Egydimenziós csillapított rezgés. a) a hely az idő függvényében, b) a sebesség az idő függvényében, c) a gyorsulás az idő függvényében és d) az  $x$ - $v$  fázissík.

F20; G20), majd ezekből trapézközelítéssel (az intervallumra átlagsebességet véve) az új  $x$  és  $y$  értékeket:

$$x_1 + \frac{(v_{x0} + v_{x1}) \cdot \Delta t}{2}; \quad y_1 + \frac{(v_{y0} + v_{y1}) \cdot \Delta t}{2}.$$

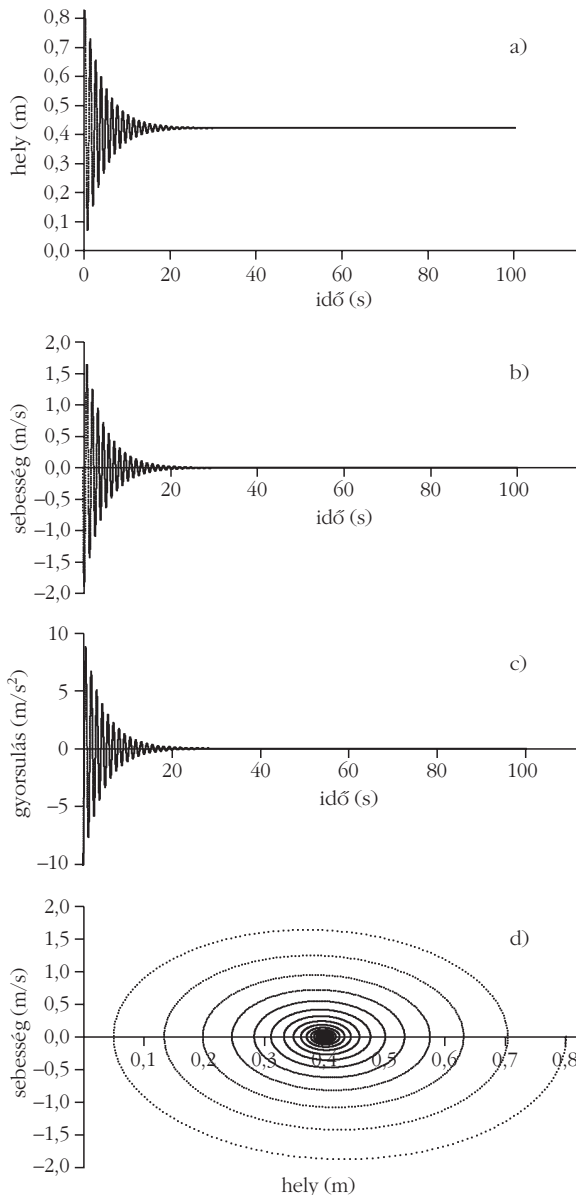
Így kicsit pontosabb, mint ha az intervallum elején vett sebességgel számolnánk. Az első hely-, illetve sebességkoordináták a felhasználó által megadott kezdeti értékek (L6; N6; Q5; Q10). Az új sebesség- és helykoordinátákkal az erő-törvényből újabb erőkomponenseket számol (L20; M20) és így tovább körülbelül 20 000 lépésben. A mozgás teljes ideje a lépések száma szorozva a  $dt$  intervallummal. Közben a gyorsulás nagyságát (E19) és az erő nagyságát (N19) is kiszámolja, valamint az  $r$  helyet a komponensekből, Pitagorasz-tétellel.



1.  $a_x = \frac{F(x, v_x, t)}{m},$
2.  $dv_x = a_x \cdot dt,$
3.  $v_x = v_x + dv_x,$
4.  $dx = \frac{v_{x,n} + v_{x,n-1}}{2} \cdot dt,$
5.  $x = x + dx.$

Az 1. egyenletben Newton II. törvénye alapján számoljuk az  $x$  irányú gyorsulást. Az erő függhet a test helyétől és sebességétől, valamint az időtől. Speciális esetben az erő állandó.

2. *ábra.* Egydimenziós csillapított rezgés az iterációs intervallumok tízszerzése esetén. a) a hely az idő függvényében, b) a sebesség az idő függvényében, c) a gyorsulás az idő függvényében és d) az  $x-v$  fázissík.



A 2. összefüggés a sebességváltozás ( $x$  irány) az adott intervallumban.

A 3. egyenletben az intervallum elején lévő sebességhez hozzáadjuk a változást, így megkapjuk az időszakasz-végi sebességet ( $x$  irányra).

A 4. egyenlet az adott időszakaszban történt  $x$  irányú elmozdulást számolja trapézközelítéssel.

Végül az 5. egyenlet az eredeti hely  $x$  értékét korrigálja a kis elmozdulással.

Az  $y$  irányú jellemzők kiszámítása teljesen hasonló egyenletekkel történik. Az iterációs eljárást kétdimenziós mozgásnál mindkét irányra elvégzi a program körülbelül 20 000 lépésig ( $n$ ), azaz a mozgás nyomon követhető  $t = n \cdot dt$  ideig.

Valamint érvényesek még az

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}, \quad v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2},$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

összefüggések is.

Most nézzünk néhány példát.

### Egydimenziós, csillapított rezgés

Az erőtvény:  $F = -D_x \cdot (l_{0x} - x) - k_x \cdot v_x.$

Az 1. *ábrán* jól látható ahogy a test mozgása csillapodik. A mozgás kezdeti feltételei: a test  $m$  tömege 2 kg, kezdeti  $x_0$  kitérése 0,8 m, a  $D_x$  rugóállandó 50 N/m, a kezdeti  $l_{0x}$  rugóhossz 0,4 m és a  $k_x$  közegellenállási tényező 1. A számolást  $dt = 0,0005$  s időintervallumokra végeztük 20 000 lépésben.

A 2. *ábrán* ugyanaz a mozgás látható az iterációs intervallumok tízszerzésével, így a megfigyelt mozgás ideje is tízszeresére növekedett, az időtartam végén szinte nyugalomba került a test.

### Hajítás 45°-os szögben, közegellenállással

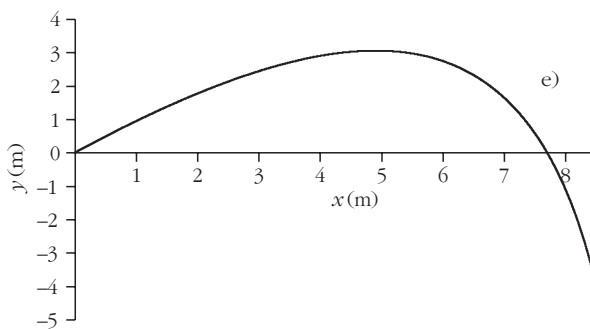
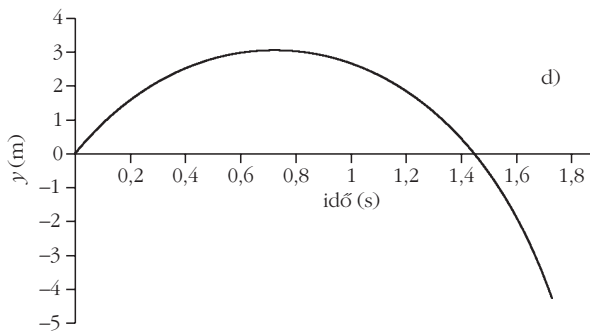
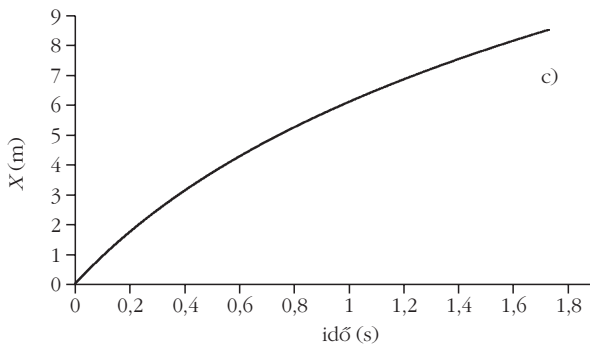
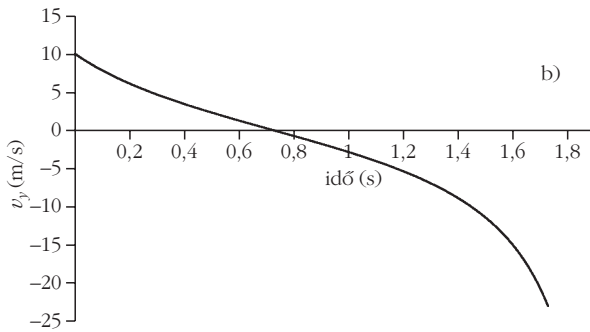
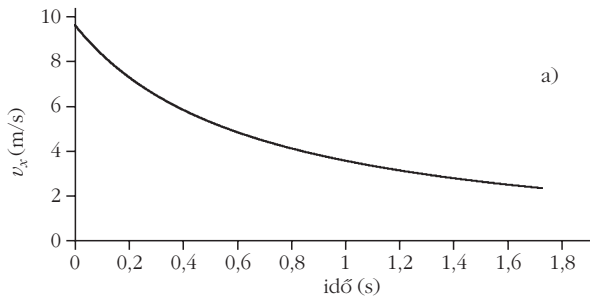
Az erőtvény:  $F_x = -C_x \cdot v_x^2$  és  $F_y = mg - C_y \cdot v_y^2.$

A 3. *ábra* jól mutatja, hogy a közegellenállásos hajításnál a sebesség nem egyenletesen változik, a pályavonal nem parabola. A mozgás kezdeti feltételei: a test  $m$  tömege 2 kg, kezdősebességének komponensei:  $v_{0x} = v_{0y} = 10$  m/s, a közegellenállási tényező:  $|C_x| = |C_y| = 0,3$  és a közegellenállás természetesen mindig lassítani igyekszik a test mozgását. A számolást  $dt = 0,0008$  s időintervallumokra végeztük 20 000 lépésben.

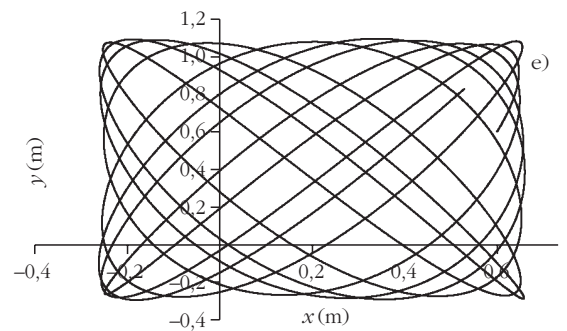
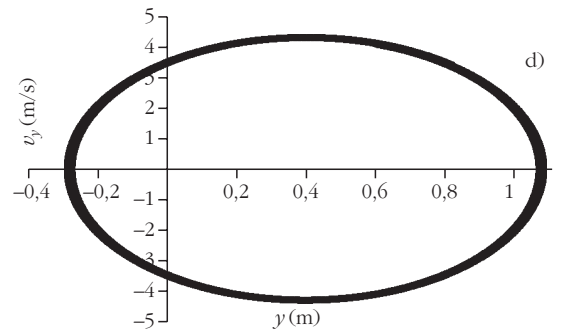
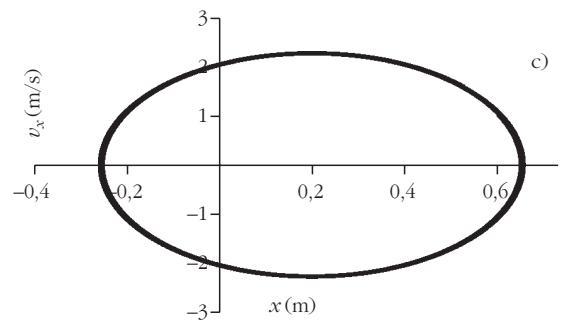
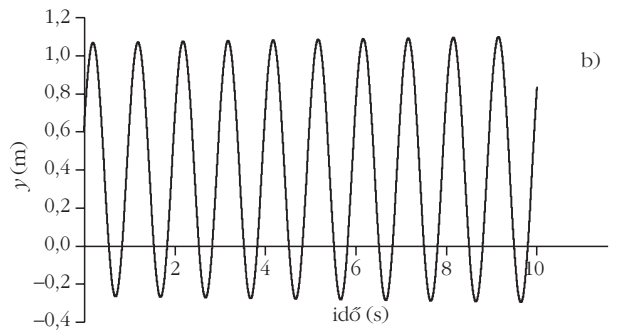
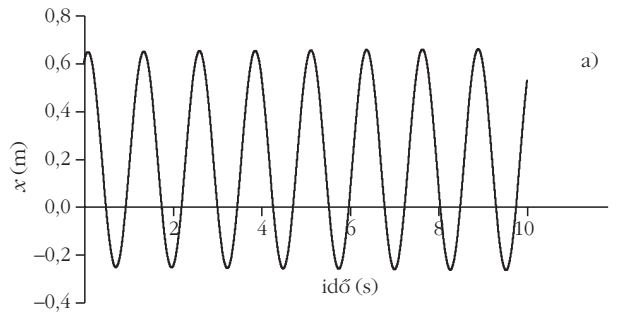
### Merőleges rezgések összetétele, Lissajous-görbe

Az erőtvény:  $F_x = -D_x \cdot (l_{0x} - x)$  és  $F_y = -D_y \cdot (l_{0y} - y).$

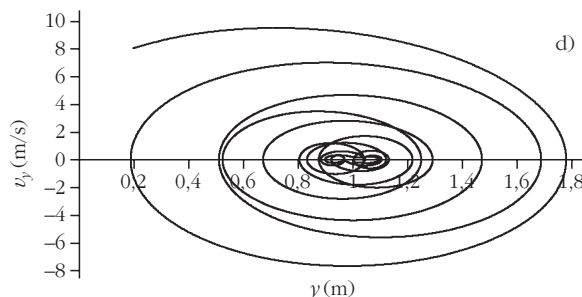
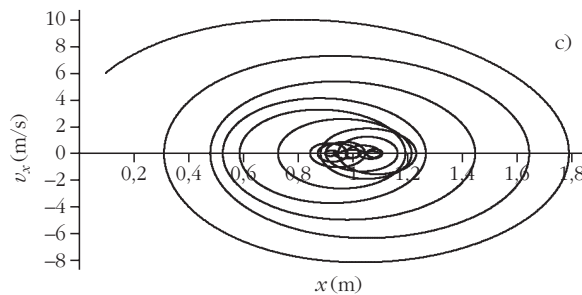
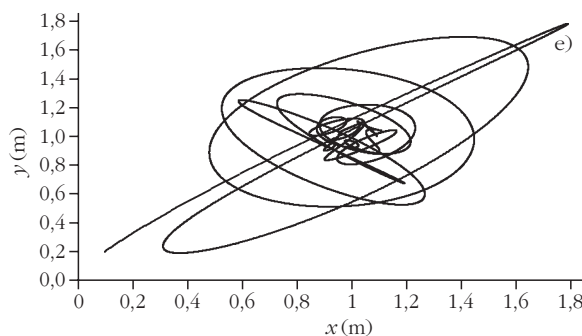
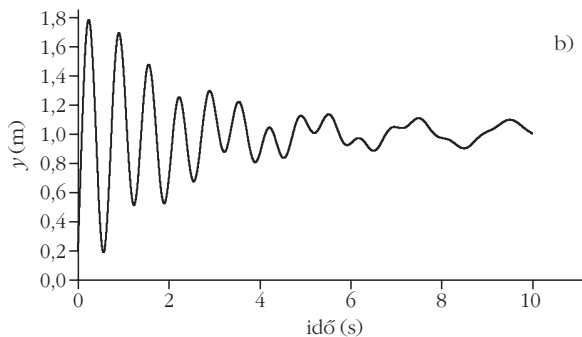
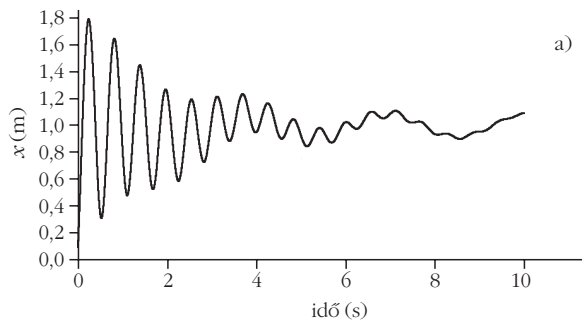
A pontszerű test egyidejűleg végez rezgőmozgást egymásra merőlegesen, eltérő amplitúdóval és frekvenciával (4. *ábra*). A mozgás kezdeti feltételei: a test  $m$  tömege 2 kg, kezdeti  $x_0$  és  $y_0$  kitérése egyaránt 0,6 m, kezdősebessége  $v_{0x} = 1$  m/s, valamint  $v_{0y} = 4$  m/s, a rugóállandó komponensei  $D_x = 50$  N/m, míg



3. ábra. Hajítás  $45^\circ$ -os szögben, közegellenállással. Az a) és b) ábrákon a vízszintes és a függőleges sebességkomponens, míg a c) és d) ábrákon a vízszintes és a függőleges elmozdulás időbeli lefutása látható. Az e) ábra mutatja a pályagörbét, mely nem parabola.



4. ábra. Merőleges rezgések összetétele. Az a) és b) ábra a két rezgési irány helyét mutatja az idő függvényében, míg a c) és d) ábra vízszintes és függőleges rezgés hely-sebesség grafikonja. Az e) ábrán látható a test pályavonala, az úgynevezett Lissajous-görbe



5. ábra. Kétdimenziós, csillapított és gerjesztett rezgés. Az a) és b) ábrán az  $x$  és  $y$  irányú szokatlan csillapodás látszik az idő függvényében. A c) és d) ábrákon mutatott  $x-v_x$  és  $y-v_y$  fázissíkokon is látszik a csillapodás. Az e) ábrán látható pályagörbe szerint a mozgás kaotikusnak tűnik.

komponensei  $D_x = 120$  N/m, míg  $D_y = 90$  N/m, a kezdeti rugóhossz  $l_{0x} = l_{0y} = 1$  m. A gerjesztő erő jellemzői: körfrekvenciája:  $\omega_x = 2$  Hz és  $\omega_y = 3$  Hz, fázisa:  $\varphi_x = 5^\circ$  és  $\varphi_y = 3^\circ$ , míg amplitúdója:  $A_x = 10$  N és  $A_y = 7$  N. A közegellenállási tényezők:  $|C_x| = 0,2$  és  $|C_y| = 0,1$ , valamint  $k_x = k_y = 1$ . A számolást  $dt = 0,0005$  s időintervallumokra végeztük 20 000 lépésben. A pályagörbét szemlélve a mozgás kaotikusnak tűnik.

Véletlenszerűen beállított értékekkel számtalan érdekes „kaotikus” ábrát kaptunk. A fentebb felsorolt esetektől eltérő beállításokkal is lehet próbálkozni. Jó szórakozást kívánunk diáknak, tanárnak egyaránt! Készítettünk egy kis animációs programot (rugó.exe), ami beállítható paraméterekkel mutatja be a mozgást. Ehhez azonban segédprogram telepítése is szükséges. Mindkettő megtalálható és letölthető a <http://www.karolyireneusz.extra.hu/e107/download.php?list.3> címen. Ugyanitt megtalálható az Excel-program dinamika néven. Hozzászólásokat, véleményeket és kérdéseket szívesen fogadunk a [jalo@freemail.hu](mailto:jalo@freemail.hu) címen.

$D_y = 80$  N/m, a kezdeti rugóhossz  $l_{0x} = 0,2$  m, illetve  $l_{0y} = 0,4$  m. A számolást  $dt = 0,0005$  s időintervallumokra végeztük 20 000 lépésben.

### Kétdimenziós, csillapított és gerjesztett rezgés

E mozgás erőtvényében csak a súrlódási tag hiányzik az általános erőtvényben leírtakból. Az 5. ábrán látható mozgás kezdeti feltételei: a test  $m$  tömege 1 kg, kezdeti  $x_0$  és  $y_0$  kitérése egyaránt 0,1 és 0,2 m, kezdősebessége  $v_{0x} = 6$  m/s, valamint  $v_{0y} = 8$  m/s, a rugóállandó



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kéri mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal.



## AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

### Simonyi Károly Tudományos Emlékezés – 2008

A 2001 októberében elhunyt *Simonyi Károly* professzor tiszteletére Tudományos Emlékezésre kerül sor a Magyar Tudományos Akadémia Felolvasótermében. A Simonyi Emlékezések sorában az idei a hatodik; az első háromnak a Gábor Dénes Főiskola, a negyediknek és ötödiknek – 2006 és 2007 őszén – az MTA adott helyet.

Valamennyi Emlékezés írásos anyaga is napvilágot látott; ezek a Gábor Dénes Főiskola *Informatika* című folyóiratában jelentek meg.

Simonyi Károly professzor humanista tudós és rendkívüli ember volt. Egyike volt az utolsó magyar polihisztoroknak, aki maradányt alkotott mind a természettudományos, mind a humán kultúra területén. Életével és munkájával bizonyította, hogy az emberiség kultúrája egy és oszthatatlan. A *Villamos-ságtan*, az *Elméleti Villamosság* és az *Elektronfizika* című műszaki könyvtrilógiájával, és *A fizika kultúrtörténete* című hézagpótló, nagy formátumú munkájával nagyszerű szellemi örökséget hagyott maga után.

Az idei Simonyi Emlékezésre – a Magyar Tudományos Akadémia és a Gábor Dénes Főiskola rendezésében – az MTA Felolvasótermében (1051 Budapest, Roosevelt tér 9. I. em.) 2008. október 17-én, pénteken 9 és 14 óra kerül sor, a program:

*Lovas István* fizikus, akadémikus: *Megnyitó*

*Horváth Tibor* villamosmérnök, professor emeritus (BME): *A villám becsapási kockázatának számítása valószerűséggel súlyozott vonzási tér alapján*

*Kostka Pál* villamosmérnök, Simonyi-díjas (MTA RMKI): *Sok millió voltos feszültségek részecskegyorsítóknál*

*Szőkefalvi-Nagy Zoltán* fizikus, Simonyi-díjas (MTA RMKI): *Analízis és szintézis Van de Graaff gyorsítóval*

*Gyulai József* fizikus, akadémikus (MTA MFA): *Az iongyorsítótól a nanotudományig – és van-e tovább?*

*Schiller Róbert* kémikus (MTA AEKI): *A kémia születése a kételkedés szelleméből*

*Zarándy Ákos* villamosmérnök, Simonyi-díjas (MTA SZTAKI): *Ezer magos processzor architektúrák és azok alkalmazásai*

## Nemzetközi tudományos konferencia atomi rendszerekben lejátszódó elemi folyamatokról Kolozsváron

2008. június 18. és 20. között került sor – a *Conference on Elementary Processes in Atomic Systems* konferenciasorozat negyedik tagjaként – a CEPAS'08 megrendezésére Kolozsváron a Babeş–Bolyai Tudományegyetem és az MTA Atommagkutató Intézet közös szervezésében. A konferencia meghirdetett témaköre igen széles volt, magába foglalta minden folyamat és jelenség tanulmányozását, amely elektronok, pozitronok, ionok, atomok, molekulák, fotonok és más anyagi alkotóelemek, valamint gázok, folyadékok és szilárd minták között létrejöhet, kis és közepes energiákon.

A konferenciát *Ladislau Nagy*, a konferencia titkára nyitotta meg. Ezt követően *Andrei Marga*, a Babeş–Bolyai Egyetem rektora és *Pálincás József*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke köszöntötte a hallgatóságot. A megnyitó ünnepséget követően *Berényi Dénes* tartotta meg az első áttekintő előadást a közel-múlt ígéretes kísérleteiről.

Az előadások a jelenlegi fizikai kutatások „forró” pontjait tükrözték:

- Az utóbbi 10 évben az ütközéses fizika csúcsát azok a kísérletek jelentik, amikor az ütközésben részt-

vevő minden részecskéről a mérések és számítások során információt gyűjthetünk be. Ezek a kinematikailag teljes vizsgálatok igen sok új, érdekes felfedezést eredményeztek.

- Szintén alig 10 éves múltra tekintenek vissza a nano-, mikrokapillárisokkal folytatott atomfizikai vizsgálatok. Először fémből készült nanokapillárisokat használtak. A fémkapillárisokkal folytatott kísérleti és elméleti munkák után nem sokkal a szigetelő kapillárisok is a figyelem középpontjába kerültek, mivel ionterelő képességük miatt technikai jelentőségük is számottevő lehet. Csak néhány éve derült fény arra a meglepő felfedezésre, hogy szigetelő kapillárisok képesek átvezetni az ionokat úgy, hogy azok töltése még akkor sem változik, amikor azt a geometriai feltételek megkövetelnék. Azaz, amikor az ionoknak a geometriai feltételek következtében a kapilláris belső felületébe kellene ütközniük, és így semlegesítődniük kellene. A jelenség ismerete a mai napig sem teljes.

- Az interferencia jelensége jól ismert a fizikusok körében. Napjainkban mégis meglepő kísérletek szí-

nesítik a fizikai megismerést. Ezekről az új kísérletekről is hallgathattunk előadásokat a konferencia során.

- Az igen nagy teljesítményű lézerek új dimenziót nyitnak mind az atomfizikai, mind pedig az anyagvizsgálatokban.

- Az anyag- és felületvizsgálat folyamatosan az érdeklődés középpontjában van. Mindehhez az anyagban és felületen lejátszódó folyamatok pontos ismerete szükséges.

- Szintén nagy érdeklődés övezi a biomolekulákkal folytatott kísérleteket. A gyorsítókkal előállított töltött részecskéket biomolekulák vizsgálatára is felhasználják. Gondoljunk arra, amikor a biorendszerek sugárkárosodását szeretnénk megismerni. Az ebbe az irányba mutató jelenlegi kutatások célja hatékony módszer kidolgozása daganatos megbetegedések kezelésére.

- Az antirészecskék tulajdonságainak viselkedése felfedezésüktől kezdve érdekli a kutatókat. Okoz-e különbséget az, hogy megváltoztatjuk az elektron vagy a proton töltését? Az antirészecskék (pozitron, antiproton) miben különböznek a megszokott részecskék által szolgáltatott értékektől. A kérdéskör vizsgálata nemcsak alap kutatás szintjén érdekes, hanem talán az energiakérdés megoldásához is közelebb vezet.

- A konferencia utolsó szekciójában egy nagy európai együttműködés, a SPARC (Stored Particles Atomic physics Research Collaboration) jelenlegi helyzetét, az ott folyó és tervezett kutatásokat mutatták be.

A konferenciának, amely háromévente kerül megrendezésre, fő támogatója az EPS. A sorozat első helyszíne Ungvár volt, majd Gdansk és három évvel ezelőtt Miskolc. A jelenlegi konferenciára 160 előadás-kivonat érkezett. A konferencián három földrészről 107 résztvevő



A résztvevők egy csoportja a poszterszekció első napján.

vő regisztrált (17 európai országból és 4 Európán kívüli országból – Argentína, Kanada, USA, Japán). 42 résztvevő érkezett Romániából. 35 szóbeli előadás hangzott el, és 83 poszter került bemutatásra.

A helyi szervezőbizottság professzionális munkát végzett. A tartalmas és magas színvonalú tudományos program mellett egyik este koncerten vehettek részt a konferencia vendégei. A konferencia tudományos bizottságának döntése értelmében a következő helyszín Belgrádban lesz.

*Tőkési Károly, ATOMKI*

## A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

### Eötvös-verseny – 2008

Az idei Eötvös-versenyt 2008. október 17-én pénteken délután 3 órától este 8 óráig rendezi meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat.

Részt vehetnek rajta mindenekelőtt az idén (2008-ban) középiskolát végzett diákok, valamint mindazok, akik jelenleg is középiskolai tanulók. Nemcsak magyar állampolgárságú versenyzők indulhatnak, hanem Magyarországon tanuló külföldi diákok, valamint külföldön tanuló, de magyarul értő és beszélő diákok is, ha 2008-ban érettségiztek, vagy jelenleg is középiskolai tanulók.

A megoldásokat magyar nyelven kell elkészíteni; a rendelkezésre álló idő 300 perc, minden segédeszköz használható, de mobiltelefont a versenyre bevinni tilos!

Előzetesen jelentkezni nem kell, elegendő egy személyazonosság igazolására szolgáló okmánnyal (sze-

mélyi igazolvány, fényképes diákigazolvány vagy útlevelel) pontosan megjelenni az alábbi helyszínek valamelyikén:

*Budapesten* az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán – XI. kerület, Pázmány Péter sétány 1/A.

*Békéscsabán* a Belvárosi Általános Iskola és Gimnáziumban – Haán Lajos utca 2–4.

*Debrecenben* a Fazekas Mihály Gimnáziumban – Hatvan utca 44.

*Egerben* az Eszterházy Károly Tanárképző Főiskola Fizika Tanszéken – Leányka utca 4–6., 118. sz. előadóterem.

*Győrben* az MTESZ Székházban – Szent István utca 5.

*Kecskeméten* a Katona József Gimnázium és Számítástechnikai Szakközépiskolában – Dózsa György út 3.



*Miskolcon* a Miskolci Egyetemen – Egyetemváros, Fizika tanszék.

*Nagykanizsán* a Batthyány Lajos Gimnáziumban – Rozgonyi út 23.

*Nyíregyházán* a Nyíregyházi Főiskola Fizika Tanszékén – Sóstói út 31/b, 309. sz. tanterem.

*Pécsen* a PTE Fizika Intézetében – Ifjúság útja 6., A/408. tanterem.

*Sopronban* a Széchenyi István Gimnáziumban – Templom utca 26.

*Szegeden* az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén – Dóm tér 9.

*Székesfehérváron* a Lánczos Kornél Gimnáziumban – Budai út 43.

*Szekszárdon* a Garay János Gimnáziumban – Szent István tér 7–9.

*Szombathelyen* a Szent-Györgyi Albert Középiskolában – Pázmány Péter krt. 28/A.

*Veszprémben* a Pannon Egyetemen – Egyetem utca 10., B épület A1 tanterem.

## HÍREK ITTHONRÓL

### Az atomoktól a csillagokig – előadássorozat az ELTE Természettudományi Kar Fizikai Intézetében

*Hallottál-e* az új genfi szupergyorsítóról, azaz a Nagy Hadronütköztetőről, a méhsejtszerű szénhálóról, a grafénről, vagy arról, mi köze a fekete lyukaknak az entrópiához és a termodinamika II. főtételéhez, mi a szerepe a villámoknak a Föld negatív elektromos töltésének fenntartásában?

*Tudod-e*, hogyan mozognak együtt a rajokban repülő madarak, melyik a legkevésbé környezetszennyező energiaforrás, hogyan bolyonganak az elemi részecskék a tizenegy dimenziós térben?

*Érdekel-e*, honnan tudhatjuk, hol és hogyan készültek a Nemzeti Múzeumban őrzött koronázási palást aranyszálai, valóban vannak-e paradoxonok és ellentmondások a relativitáselméletben, milyenek a csak néhány atomnyi mennyiségben előállított szupernehéz elemek kémiai tulajdonságai?

*Szeretnél-e* többet tudni az új felsőoktatási rendszerről, a három egymásra épülő cikluson alapuló egyetemi képzésről?

*Ha érdekelnek e kérdések és a tudomány válaszai*, gyere el a 2008 szeptemberében kezdődő előadássorozatunkra!

Az ELTE TTK Fizikai Intézetében tevékenykedő kutatók és oktatók beszélnek a fizika frontvonalába tartozó fizikai érdekességekről, újdonságokról.

*Bemutatjuk* azokat a lehetséges tanulmányi utakat is, amelyet a hazai felsőoktatás patinás, nemzetközi

hírnévnek és elismertségnek örvendő egyeteme kínál a vállalkozó kedvű, érdeklődő fiataloknak.

*Részletes program:* a <http://www.atomcsill.elte.hu>.

A fenti, folyamatosan frissített honlapon megtalálhatók az elhangzott és a közeljövőben tervezett előadások címei, előadói és rövid ismertetései, sőt minden, a sorozat kezdete óta elhangzott előadás anyaga, köztük a legtöbb előadás videofelvétele is letölthető erről a honlapról.

Ha ennél is jobban érdekelnek ezek a kérdések, iratkozz be az ELTE TTK fizika BSc szakára! Három év után választhatsz, fizikus, geofizikus, csillagász, meteorológus vagy fizikatanár akarsz-e lenni.

Az ELTE-re jelentkező, és itt fizikához kapcsolódó tanulmányokat folytató diákok – természetesen a tudomány alapjainak megismerése mellett – már hallgató korukban bekapcsolódhatnak a Fizikai Intézetben folyó, a fizika frontvonalába tartozó izgalmas kutatásokba, melyből ízelítőt nyújt sorozatunk is.

Sorozatunkra természetesen azokat is várjuk, akik nem akarnak a fizikával hivatásszerűen foglalkozni, csak egyszerűen érdeklő őket ez az érdekes, gyönyörű, sokszínű, sokoldalú tudomány, az összes természettudomány alaptudománya.

Szeretettel várunk Téged, barátaidat, tanáraidat és szüleidet sorozatunkon!

az *ELTE TTK Fizikai Intézet munkatársai*

## A tudomány tanítása – a tanítás tudománya

A fenti címmel rendezett tanévnyitó szakmai konferenciát 2008. augusztus 29-én a HUNGEXPO csarnokában a 18. születésnapját ünneplő Apáczai Kiadó. A több mint háromezres hallgatóság a házigazda és *Szili Katalin*, az Országgyűlés elnökének köszöntője után *Pálinskás József* akadémikus, az MTA elnökének nyitóelőadását hallgathatta meg.

Előadást tartott még *Arató Gergely*, az OKM államtitkára, *Pokorni Zoltán* országgyűlési képviselő, oktatáspolitikus, *Czeizel Endre* orvosgenetikus, *Jókai Anna* Kossuth-díjas író és *Esztergályos Jenő*, az Apáczai Kiadó igazgatója. A résztvevők szakterületük aktuális kérdéseit ez után hat szekcióban vitathatták meg.



## Pálinkás József előadása

„Nem tanítunk mesterséget és nem képesítünk semmi mesterségre. Nem tanítunk ismereteket, vagy a feledésnek. Nem tanítunk tudományt: a tudomány nem 10–18 éves gyermekeknek való; aki tudományt akar tanulni, annak már nagyon jól kell gondolkodni tudnia. Gondolkodni és beszélni tanítunk.”

Tisztelt Házelnök Asszony!  
Nagyra becsült Tanár- és Tudóskollégák!  
Tisztelt Hallgatóim!

A nagykorúvá vált Apáczai kiadó tanévnyitó konferenciájának előadóit, résztvevőit, a megjelenteket tisztelettel köszöntöm és hívom közös gondolkodásra *Babits Mihály* gondolataival arról, mit és miért tart igazán fontosnak a középiskolai oktatásban.

A *tudomány tanítása*, így szól előadásom kezdő gondolati fonala, és a költő-tanár rögvest rávágja: az iskolában „Nem tanítunk tudományt”. A képzeletbeli dialógust folytatva, a kihívást elfogadva kérdezem, mit érhetünk tanítható tudomány alatt?

A tudomány nem ismerethalmaz, nem egyszerűen tények, bizonyítékok gyűjtése, nem a tapasztalás monolit egysége. És nem csak értelmezés, magyarázat, elméletalkotás. Ha valamit ismer, azt nem statikusan, hanem dinamikusan teszi, ha valamit összegyűjt, azt nem bezárja, hanem megnyitja a gondolkodásnak.

A tudomány nem feltétlenül az egyetlen megnyugtató válasz megtalálásának igénye. Ha valamit keres, az sokkal inkább a rend. Ha valamire rátalál, az a teremtet világ végtelen csodája.

A tudomány nem távoli, nem csupán a megszállottak vagy kiválasztottak kenyere. Ha a tudomány még mindig azt vállalja, hogy az élet nagy kérdéseire keresi a választ, akkor nem úrbéli magaslaton látszik, hanem itt, mindennapi életünkben, nagyon is közel.

A tudományt mégis távolinak érzik az emberek. A tudós éteri magasságokban, szinte felfoghatatlan eredményeket ér el, ezeknek a többi ember számára való haszna gyakorta homályos. A tudomány a hétköznapi ember számára a csodás érthetlenség, a

ragyogó különlegességek, a specializációk specializációjának világa.

A reklámokban kreált és ismétléssel ránk erőltetett, ismeretlen kifejezések adják el a termékeket, amelyek éppen azért válnak vonzóvá, mert nem értjük, hogy mitől jók.

A tudomány messzi világától sokszor még az egyetemi átlaghallgató is ódzkodik, mintha örvény közelében úszna, amely, ha nem vigyáz, elsodorja, ki tudja, hová. Amikor a tudomány kiszakad abból az életszövetből, amelyre vonatkozott, amikor eltávolodik a lényeg meglátásának akarásától, akkor keltheti ezt a képzetet önmagáról.

Minek tanulunk annyi elméletet? Mire lesz ez később nekem jó? Mire használhatom majd? Kérdezik gyakran a felsőbb iskolák diákjai, hallgatói. A tudomány, ilyen értelemben semmire nem jó. Pontosabban fogalmazva, nem praktikus, nem váltható be, mint egy csekk. Nem feltétlenül a siker és az érvényesülés záloga. És, azt hiszem, éppen ezért nem is mindig vonzó a mai gyerekek, fiatalok számára.

Amivel kecsegtet, az a szellemi világ gazdagsága, a megfoghatótól való elszakadás és visszatalálás, az a magány, amelyben a teljesség érzését, a megértés bizonyosságát keresni belső készletessé válik.

Ezek nem mai, *látzatvilágunk* leghívogatóbb ígéretei. A tudomány nem a könnyebb élet választása, hanem a hívás meghallása, hivatás.

A tudomány, ha kisszerű, akkor nagyra vágyik, ön-hitt, uralni és használni akarja azt, amit kiderít. A tudomány, ha nagyvonalú, akkor alázatos, figyelő, akkor szolgálja azt, amit megismer. A tudomány akkor alkot igazán nagyot, akkor végez értékes munkát, ha a bölcsesség alapjain és elvein nyugszik.

De studio sapientia – erről beszél, ennek magyarázatára vállalkozik a fiatal *Apáczai Csere János*, amikor katedráját elfoglalva beszédet mond.

Idézem: „E szó: sapientia, hallgatóim, tulajdonképeni és közvetlen jelentése szerint testi dolgokra vonatkozik. Sapere ugyanis semmi mást nem jelent, mint a megízlelt dolog tulajdonságát és hatását lelkünkkel felfogni. Innen találoan viszik át az emberi értelem azon tevékenységének kifejezésére, melynek segítségével az elvekben és alaptételekben foglalt elgondolások lényegébe úgy behatolunk, hogy mindazt, amit innen következtetni lehet, előre látjuk. De értjük ezen a szón az egész műveltséget, bölcsességet, az értelem tevékenységét, és egyszóval az egyetemes enciklopédiát, vagyis azoknak a dolgoknak módszeres összefoglalását, melyeket tudni szükséges, és a jelen alkalommal mi éppen az utóbbi jelentésre irányítjuk figyelmünket, mivel az a szándékunk, hogy ebben a szóban foglaljuk össze mindazt, amit a legjobb és legszükségesebb tudunk az emberi élet folyamán.”

A tanárkiválóságot, a kiadó névadóját követve magam is azt gondolom, hogy a bölcsesség és a tudomány, a bölcs belátáson alapuló tudás a legszükségesebb, amit nekünk és diákjainknak is tudnunk kell az emberi élet folyamán.

(<http://www.mta.hu/>)

## Kipukkadt a buborék – a „buborékfúzió” felfedezője elvesztette professzori állását

Az amerikai Purdue Egyetem bejelentette, milyen szankciókat alkalmaz *Rusi Taleyarkhan* ellen, miután egy belső vizsgálóbizottság 2008. júliusban megállapította, hogy kutatásaiban nem tartotta be a szakmai etika szabályait. A nukleáris mérnök Taleyarkhan, aki 2002-ben bejelentette, hogy felfedezte a „buborékfúziót”, elveszti professzori címét és legalább három évig nem lehet doktori disszertációk témavezetője. Taleyarkhan továbbra is tagja marad az egyetem oktatói karának, azonban rangja csökken, és „különleges posztgraduális oktató” („special graduate faculty”) lesz. A vizsgálóbizottság júliusban megállapította, hogy a saját laboratóriuma kutatóinak cikkét úgy állította be, mint állítólagos „felfedezésének” független megerősítését. *Randy Woodson*, a Purdue Egyetem kutatási rektorhelyettese, a vizsgálóbizottság elnöke kijelentette, hogy három év múlva újból kiértékelik Taleyarkhan tevékenységét, és akkor döntenek majd el, hogy visszakaphatja-e professzori címét és korábbi beosztását.

Taleyarkhan nyilatkozatában a döntést ésszerűtlennek minősítette, mivel „a szankciók igazságtalannak és kivételesen súlyosak”. Azt is hangsúlyozta, hogy 2006-ban egy korábbi vizsgálóbizottság már felmentette a vádak nagy része alól. Az új vizsgálat, amely azzal is gyanúsítja, hogy meghamisította a kutatási jegyzőkönyveket, szerinte a Kongresszus politi-

kai nyomására indult meg, amelyet a *Nature*-ben megjelent cikkek váltottak ki.

Taleyarkhan, aki polgári pert indított az egyetem ellen, nem zárja ki további jogi lépések lehetőségét, azonban ügyvédje, *John Lewis* szerint lehet, hogy az elmúlt évek során ügyfele már belefáradt a jogi csatározásokba és ezért inkább a kutatásra és oktató munkájára fogja összpontosítani tevékenységét.

A buborékfúzió körüli vita 2002-ben kezdődött, amikor az Oak Ridge Nemzeti Laboratóriumban dolgozó Taleyarkhan társzerzőként egy cikket jelentetett meg a *Science* című folyóiratban (*Science* 295 (2002) 1868). A cikkben arról számoltak be, hogy folyadékot ultrahanggal besugározva a keletkező buborékokban olyan magas hőmérsékletet értek el, hogy fúziós reakciók is végbe mentek. Az eredményeket azonban más kutatócsoportoknak nem sikerült reprodukálni, sőt a Purdue Egyetem két mérnöke, *Lefteri Tsoukalas* és *Tatjana Jevremovic* azt állította, hogy Taleyarkhan meg akarta akadályozni negatív eredményeik publikálását. Ez utóbbi vádak a későbbi vizsgálat nem erősítette meg, azonban bizonyos kifogások nyomán új vizsgálatot indítottak. Ez utóbbi vizsgálatot végző bizottság már áprilisban befejezte munkáját, azonban csak idén júliusban hozta nyilvánosságra jelentését, amikor azt a Taleyarkhan kutatásait finanszírozó Office of Naval Research jóváhagyta.

## Gamma-sugár teleszkópot neveztek el Fermiről

A NASA Gamma-ray Large Area Space Telescope berendezését sikeresen kalibrálták és elkezdte felkutatni a Világegyetem gamma-sugárforrásait. A nemzetközi projektben, amelynek keretében júniusban állították Föld körüli pályára a teleszkópot, *Enrico Fermi* olasz-amerikai fizikus tiszteletére a *Fermi Gamma-ray Space Telescope* névre keresztelték át. Ebből az alkalomból a NASA közzétette a Fermi-teleszkópból (Fermi's Large

Area Telescope – LAT) beérkezett első adatokat: a teljes égboltról négy nap alatt készített gamma-sugárzási képet. A NASA szerint egy hasonló felbontású kép készítése a Fermi-teleszkóp elődje, a Compton Gamma-ray Observatory segítségével több évig tartott volna. A négytonnás berendezést amerikai, francia, német, olasz, japán és svéd kutatók készítették.

(<http://physicsworld.com/>)

## Műholdak segítenek fényt deríteni a grönlandi jég fogyásának rejtélyére

Új módszer segítségével követhetik nyomon Grönland délkeleti részén a jégtakaró gyorsan változó erőzőjét. A korábbi vizsgálatok két gyorsan vékonyodó gleccserre összpontosítottak, azonban ezek a teljes jégvesztésnek csupán kis részét teszik ki. A sziget gravitációs területnek műholdak segítségével történő mérése arra utal, hogy sokkal nagyobb méretű a jégtömeg csökkenése, mint amire a két gleccser vizsgálatából következtetni

lehet. A Colorado Egyetem kutatói *Ted Scambos* vezetésével a gleccserek egy jóval nagyobb osztályára terjesztették ki a vizsgálatokat. Lézeres mérés technikával meghatározták a szárazföld feletti jégréteg vékonyodását, és műholdas felvételekkel figyelték a jégrétegek szélének változásait. Az adatok azt mutatják, hogy a terület évente több mint 100 köbkilométernyi jéget veszít.

([www.nature.com](http://www.nature.com))

## »AZ EGYÜTT ELTÖLTÖTT IDŐK EMLÉKÉRE«

Egy közönséges könyvnek van egy vagy néhány szerzője, egy kiadója és valami elkedvetlenítő ára. A szóban forgó könyvnek van két kiadója, száz szerzője és nincs ára. Nem kereskedelmi furfangból ár nélküli, hanem mert nem szánták terjesztésre. A szerzők száma úgy száz, hogy lehetne akár ezer is, ha a szerzőknek abból a közös tulajdonságából indulunk ki, hogy mind ugyanattól a tanárnőtől tanulták a fizikát. A szerkesztők azonban úgy gondolták, hogy az ünnepelt minden letöltött évéhez egy tanút állítanak, így lett szerző *Kugler Sándorné* 100 tanítványa és kollégája.

Egy szokásos hatvanadik vagy hetvenedik születésnap köszöntőinek monoton unalma után a sokat halott és látott reménybeli olvasó felve lapoz bele egy ilyen kiadványba. Úgy vélheti, hogy három köszöntő elolvasása után új mondanivalót már nem talál. De ebben a könyvben másképp van – esetleg a szerkesztők gondos válogatása, talán a száz év impozáns ritkása teszi, de nem a közhelyek diadalmaskodnak. Végigolvasva a több mint másfélszáz oldalnyi köszöntőt, az a meggyőződés alakul ki az olvasóban, hogy az ünnepelt az oka a vélemények változatosságának. Ő az oka, mert minden visszaemlékezésből ugyanaz a portré körvonalazódik – egy tárgyszerető, a fizikát elfogadtatni képes, következetes, odafigyelő tanárnő képe. És mert a tárgy azonos, az alanyok, a visszaemlékezők egyénisége, különössége tud megjelenni a véleményekben.

Ritka olvasmány, nem csak a száz év különössége miatt. *Kedves Györgyi néni* – kezdődnek többnyire a köszöntők, majd az iskolai emlékek következnek, végül a beszámoló az azóta eltelt átlag negyven év eseményeiről. Az iskolai emlékek gyakran az eredményes szereplést jelentik a fizikaversenyeken, végül is a visszaemlékezők között mindenféle akadémikusok, meg professzorok fordulnak elő. De a többi életpályabeszámoló legalább olyan érdekes: orvosok, mérnökök, tanárok útja az ötvenes-hatvanas évektől napjainkig. Különösen tanulságos azok esete, akik Györgyi néni példáját követve lettek fizikatanárok, és szerencsés esetben az ő vezetésével végezték gyakorló tanításukat. Előrehaladva a levelek olvasásában mindinkább sajnáljuk, hogy valószínűleg nem lesz majd hivatásos író, aki ebből az anyagból hozna létre valódi irodalmat. Továbbra is az *Aranysárkány* Novák Anta-

lának szárandó alakja képviseli a fizikatanárt a klasszikus irodalomban. *Kosztolányi* könyvében megjelenik egy elkedvetlenül bonyolult fizikai képlet is, nyilván az érettségien elbuktatott, majdani tanárverő diák mentségére, egy olyan formula, amit nyilván nem lehet és nem is érdemes megtanulni.

Manapság az érettségien, de egy hétköznapi fizikaórán is ott a képletgyűjtemény, amelyben sok formula szerepel; az *Aranysárkány*-bélénél szelídebbek, de a felesleges biflázástól a diákokat megkímélik. Kugler Sándorné érdemei között legtöbb tanítványa megemlíti a képlettár társszerzőségét, a legidősebb visszaemlékezők különösen a mértékrendszerek közötti átszámítás segítését dicsérik. Az SI-rendszer elterjedésével ez a gond csaknem elenyészett, de ötven éve még sokan mondtak le a fizika megértéséről pusztán a kilopond értelmezésbeli nehézsége miatt. Látszólag egyszerű dolog egy képlettár összeállítása, ám elfogadtatásához szemléletváltást kellett elérni. Ami pedig a mértékrendszerek átszámítását illeti, ne feledjük, hogy *Maxwell* az áram elektromos és mágneses rendszerben mért értéke összehasonlításának alapján következtetett arra, hogy az elektromágneses hullám fénysebességgel terjed.

Egy könyvformába rendezett megemlékezéscsokorról van szó, ami tanulságos és ajánlható kötet lenne, hiszen *Kovács László* szerkesztő és *Szabados László* olvasó-szerkesztő nagyon sok és kiváló munkát végeztek. Azért a feltételes mód, mert nem beszélhetők könyvről van szó, hanem egy nyomdaterméről, amelynek példányait a szerzők között szétosztották, a néhány többletkötet pedig a születésnap ünnepség során lelt gazdára. Jó lenne, ha legalább az interneten lenne hozzáférhető, hiszen olyan nehéz szívmelengető olvasmányhoz jutni a (fizika)tanárságról, ami ilyen mértékben hiteles lenne.

## Az oktatási miniszter elismerő oklevele

Kugler Sándornét, 100. születésnapja alkalmából *Hiller István* miniszter az *Oktatási miniszter elismerő oklevele* kitüntetésben részesítette. Az ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Gimnázium nyugalmazott tanárnőjének *Zentai László* rektorhelyettes adta át a kitüntetést.

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



**nka**  
Nemzeti Kulturális Alap

**mym**  
paksi atomerőmű

**NCA**  
Nemzeti Civil Alapprogram





