

# fizikai szemle



2005/11

**A Magyar Tudományos Akadémia  
Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság és  
az Oktatási Minisztérium  
folyóirata**

Főszerkesztő:

**Berényi Dénes**

Szerkesztőbizottság:

**Barlai Katalin (Csillagászat),  
Faigel Gyula,  
Gnädig Péter (Négyzögletes kerék),  
Gyulai József,  
Horváth Dezső (Mag- és részecskefizika),  
Jéki László, Kanyár Béla (Sugárvédelem),  
Németh Judit, Ormos Pál (Biofizika),  
Papp Katalin,  
Sükösd Csaba (Vélemények),  
Szőkefalvi-Nagy Zoltán (Biofizika),  
Tóth Eszter, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor (A fizika tanítása)**

Szerkesztő:

**Hock Gábor**

Műszaki szerkesztő:

**Kármán Tamás**

A lap e-postacíme:

**fizszem.elft@mtesz.hu**

A folyóiratba szánt írásokat erre a címre kérjük.

E szám vendégszerkesztője:

**Jéki László**

A címlapon:

**Ötven évvel ezelőtt a Minisztertanács  
4081/1955/III.10. MT. számú  
határozatával rendelte el a csillebérci  
Kísérleti Atomreaktor építését; a képen  
a reaktortartály behelyezése látható.**

## TARTALOM

<i>Csikai Gyula</i> : A neutronfizika másodvirágzása	369
<i>Szatmáry Zoltán</i> : Neutronzaj reaktorokban	371
<i>Tóth Eszter, Hámosi Krisztián</i> : A lakóterei radonszint eloszlásáról	375
<i>Szabó György</i> : Versengő társulások	378
<i>Rácz István</i> : Létezik-e a kozmikus cenzor?	382

### MEGEMLÉKEZÉSEK

Pál Lénárd 80 éves ( <i>Berényi Dénes</i> )	387
Pál Lénárd köszöntése három pályatárstól ( <i>Lovas István, Kroó Norbert, Gyulai József</i> )	388
Pál Lénárd és a Központi Fizikai Kutató Intézet ( <i>Tétényi Pál</i> )	393
Mindig izgatott a „miért?” kérdése – <i>Jéki László</i> beszélgetése <i>Pál Lénárd</i> akadémikussal	395
Farkas Henrik, 1942–2005 ( <i>Noszticzius Zoltán</i> )	399

### A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Vannay László, Fülöp Ferenc, Máthé József, Nagy Tamás</i> : A Fizika Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny harmadik fordulója a harmadik kategória részére – 2005	400
---	-----

### MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

A Nipkow-tárcsától a színes televízióig – II. ( <i>Mester András</i> )	403
--	-----

### HÍREK – ESEMÉNYEK

	404
--	-----

*J. Csikai*: The second blossoming of neutron physics  
*Z. Szatmáry*: Neutron noise in nuclear reactors  
*E. Tóth, K. Hámosi*: The distribution of radon level values in our population's dwelling space  
*G. Szabó*: Competing associations  
*I. Rácz*: Is there a cosmic censorship?

### COMMEMORATIONS

Academician Lénárd Pál 80 years of age (*D. Berényi*)  
Commemorating L. Pál (*I. Lovas, N. Kroó, J. Gyulai*)  
L. Pál and the Central Research Institute for Physics (*P. Tétényi*)  
I always used to wonder “why?” – *L. Jéki's* talk with academician *L. Pál*  
Henrik Farkas, 1942–2005 (*Z. Noszticzius*)

### TEACHING PHYSICS

*L. Vannay, F. Fülöp, J. Máthé, T. Nagy*: The Hungarian Secondary Schools' Competition in Physics – 2005

### SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

From Nipkow's disc to color TV – II (*A. Mester*)

### EVENTS

*J. Csikai*: Die zweite Blüte der Neutronenphysik  
*Z. Szatmáry*: Neutronen-Rauschen in Kernreaktoren  
*E. Tóth, K. Hámosi*: Die Verteilung der Radon-Pegelwerte im Wohnungsraum unserer Bevölkerung  
*G. Szabó*: Bündnisse in Wettbewerb miteinander  
*I. Rácz*: Gibt es eine kosmische Zensur?

### ZUR ERINNERUNG

Akademie-Mitglied Lénárd Pál 80 Jahre (*D. Berényi*)  
L. Pál zum 80. Geburtstag (*I. Lovas, N. Kroó, J. Gyulai*)  
L. Pál und das Zentral-Forschungsinstitut für Physik (*P. Tétényi*)  
Ich pflegte immer zu fragen „warum?“ – *L. Jéki* spricht mit Akademie-Mitglied *L. Pál*  
Henrik Farkas, 1942–2005 (*Z. Noszticzius*)

### PHYSIKUNTERRICHT

*L. Vannay, F. Fülöp, J. Máthé, T. Nagy, P. Vankó*: Wettbewerb in Physik Ungarischer Mittelschulen – 2005

### WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Von der Nipkow'schen Scheibe zum Farbfernsehen – II (*A. Mester*)

### EREIGNISSE

*Д. Чикаи*: Второй расцвет нейтронной физики  
*Э. Сат.лари*: Нейтронный шум в реакторах  
*Э. Тот, К. Га.иори*: Распределение мер загрязненности радоном жилищ нашего населения  
*Д. Сабо*: Соперничества союзов  
*И. Раи*: Существует-ли космический цензор?

### НА ПАМЯТЬ

Академику Ленарду Паль 80 лет (*Д. Берени*)  
Приветствование академика Л. Паль со дня рождения (*И. Ловаш, Н. Кроо, Й. Дью.ли*)  
Л. Паль и Центральный Исследовательский Институт по Физике ВАН (*И. Тетени*)  
Я постоянно задавался вопросом «почему же?» – разговор *Л. Еки* с академиком *Л. Паль*  
Генрик Фаркаш, 1942–2005 (*З. Ностичиу*)

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*Л. Ваннаи, Ф. Фю.лен, Й. Матэ, Т. Надь*: Конкурс по физике венгерских средних школ – 2005

### НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

От диска Нипкова к цветному телевидению – II (*А. Меумер*)

### ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

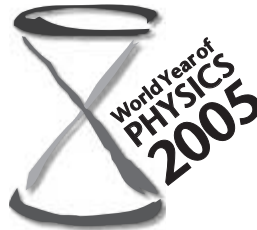
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

11. szám

2005. november

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



## A NEUTRONFIZIKA MÁSODVIRÁGZÁSA

Csikai Gyula  
Debreceni Egyetem és  
MTA Atommagkutató Intézet

Az atomenergia gyakorlati méretű felszabadításának lehetősége mind szabályozott, mind robbanásszerű formában bő 60 évvel ezelőtt bizonyítást nyert. A neutronok által vezérelt láncreakcióban keletkező energia optimális kihozatalára és hasznosítására, valamint a nukleáris erőművek biztonságos üzemeltetésére világszerte széles körű alap- és alkalmazott kutatási programok, valamint technológiai fejlesztések indultak. A fizika fejlődése szempontjából a neutron felfedezése (1932) volt a döntő, de a fizikai kutatások támogatását a neutron-kölcsönhatások egyik melléktermékének, az atommaghasadás alkalmazásának köszönhetjük. Hazánkban az első kísérleti atomreaktor 1959. március 29-én az MTA KFKI-ban helyezték üzembe 2 MW teljesítménnyel, de az ilyen irányú alapkutatást és képzést Budapesten és Debrecenben az 50-es évek elejétől számíthatjuk. A többéves oktatási tapasztalaton alapuló egyetemi jegyzetek már 1956-tól megjelentek [1–3], míg radioaktív ( $\alpha, n$ ) neutronforrások (főleg a  $^{210}\text{PoBe}$ ) felhasználásával új és a korábnál pontosabb neutrondiffúziós paraméterek meghatározása történt [4–8]. Ezekben a kutatásokban a KFKI munkatársai közül *Ádám András*, *Bata Lajos*, *Kiss István*, *Kosály György* és *Pál Lénárd*, míg az ATOMKI Neutronfizikai Osztálya részéről, amely 1956-ban alakult, *Csikai Gyula*, *Daróczy Sándor* és *Dede Kálmán Miklós* vett részt. A KFKI kutatói másokkal szinte egy időben ismerték fel, hogy energiatermelő reaktorokban a nagyobb termikus hatásfok eléréséhez célszerű lenne a víznél jóval magasabb forráspontú (250–350 °C) szerves moderátorokat és

hűtőközegeket, például polifenil-folyadékot használni. Pál Lénárd és munkatársai Dowtherm-A esetén a termikus neutronok diffúziós hosszát és hőmérsékleti koefficiensét széles tartományra határozták meg, amely adatok e közegek neutrondiffúziós paramétereinek alkalmazásakor ma is referenciának minősülnek [9]. Kiindulva a Pál és munkatársai által alkalmazott módszer geometriai korlátaiból, Debrecenben sikerült olyan eljárást kidolgozni [8], amely a diffúziós hossz méréséhez használt 500–600 liter mintát néhány literre csökkentette, és így a pontosság mind a statisztika, mind a konstans hőmérséklet miatt kedvezőbb volt. Pál Lénárd ekkor javasolta, hogy a két csoport működjön együtt a neutrongáz-fizikai kutatásokban, mondván, meglehet, hogy ez a téma nem vezet eredményre, mivel a szerves közegek sugárhatás-kémiai folyamatait nem ismerjük eléggé, de a neutrontereket jellemző fizikai paramétereket a különböző alkalmazások miatt komplex rendszerekre is meg kell határozni, és erre a Debrecenben kidolgozott módszer kedvezőnek látszik. Észrevétele és javaslata annyira beigazolódott, hogy ezek a kutatások a „másodvirágzás” idejére is áthúzódtak. Kezdeményezte továbbá a kísérleti atomreaktornál is közös vagy független kutatások végzését. Ennek első eredménye a nagy aktivitású fotoneutron-források készítése és magfizikai alkalmazása volt, amelyet 1961-től a KFKI több munkatársával közösen végeztünk [10, 11]. A fotoneutron-forrásokkal 1 MeV alatti tartományban mért neutronadatokat, főleg az izomer hatáskeresztmetszet-viszony energiafüggését máig is sokan idézik. Érdeemes megjegyezni, hogy ugyan a reaktornál az *organikus kísérleti burrok* csak 1963-ban kerültek megépítésre, de ez így

*Pál Lénárd*nak ajánlva, 80-ik születésnapjára.



is a második volt a világon. A reaktor létesítését megelőzően a kísérleti kutatások mellett kiemelkedő elméleti eredmények is születtek. Ezek egyike a hasadási neutronszám ingadozását leíró elmélet, a *Pál-Bell-egyenlet*, amelyet már 1958-ban publikáltak, de igazolása csak a 60-as évek közepén sikerült, a KFKI *ZR-3 kritikus rendszer* üzembe helyezése után [12]. Az eredmény fontosságát bizonyítja, hogy ez a „másodvirágzás” feladatai között is kiemelten szerepel.

*Szalay Sándor* kezdeményezésére Debrecenben az 50-es évek elején elkezdődött a Van de Graaff gyorsító és a neutrongenerátor építése. Az alacsonyfeszültségű (300 kV) neutrongenerátort 1958-ban az ATOMKI-ban helyeztük üzembe [13], amellyel a neutronfizikai kutatások technikai háttere jelentősen bővült. A  $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  és a  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  reakciókban (D+D, D+T) keletkező 3, illetve 14 MeV energiájú neutronokkal nagyszámú hatáskeresztmetszet meghatározása történt különböző atommagfolyamatokra, ami jól csatlakozott a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) nukleáris kutatási és képzési programjához. A tanszéki Van de Graaff gyorsító fejlesztéséhez kapcsolódóan 1956-tól több eredmény került publikálásra, majd 1963-ban [14] az első magfizikai dolgozat, amely az integrális neutronhozam energiafüggésének meghatározására vonatkozott a  $^9\text{Be}(d,n)$  reakcióban. Ez a reakció a „másodvirágzás” egyik fontos szereplője. Ezekkel a kutatásokkal párhuzamosan a KFKI munkatársai 1957-től a neutrongenerátorok egész sorát fejlesztették ki [15], így például az NG-200 (1957), NA-1 (1964), NA-2 (1967) típusokat, és elkészült egy impulzusüzemű D+T-forrás is [16]. Itt kell megemlíteni, hogy a KFKI-ban 1960 októberében üzembe helyezték az első hazai tervezésű és építésű atomreaktort, a *ZR-1 kritikus rendszert*, amelyet a különböző célú ZR-modellek sok éven át sikeresen követtek. Ezek a nemzetközi együttműködésben folyó kutatások a Paksi Atomerőmű tudományos és technikai hátterét is biztosították, amelynek első blokkja 1983-ban kezdte meg az energiatermelést.

Debrecenben a neutronfizikai kutatások 1967-től a DE TTK Kísérleti Fizikai Tanszékén folynak, jelentős NAÜ-támogatással (technikai segélyek, kutatási szerződések, külföldi szakértői megbízatások, külföldi szakemberek csoportos és egyéni képzése, tanfolyamok vagy ösztöndíjak keretében, meghívás NAÜ-programok kidolgozására, felkérés szakmai jelentések készítésére és értékelésére, speciális eszközök tervezése és kivitelezése a fejlődő országok számára stb.). A NAÜ szakértői megbízatásai fontos részét képezte a KFKI által kifejlesztett kisméretű, mobil NA-1, NA-2 neutrongenerátorokra alapozott nukleáris kutatási és képzési programok meghonosítása a fejlődő országokban. Közben a kutatási lehetőségek Debrecenben is jelentősen bővültek, így például a tanszéki két saját fejlesztésű (az egyik nagyáramú) 180 kV-os és egy, a NAÜ által adott impulzusüzemű generátorral, egy  $2 \times 10^9$  n/s hozamú  $^{252}\text{Cf}$ -forrással.

A fentiekben vázolt kutatási és fejlesztési időszakot tekintem a hazai neutronfizika első virágzásának, amelyben a kísérleti reaktor a csatlakozó mérőberendezésekkel a reaktorfizikai kutatásokon túl, a magfizika, a szilárdtestfizika, a nukleáris analitika, az izotóptechnika, a radio-

gráfia terén meghatározó szerepet játszott. Ezeket az eredményeket foglalja össze az Akadémiai Kiadó gondozásában 1971-ben megjelent, 25 szerző által írt *Neutronfizika* című könyv, amelynek előszavában Pál Lénárd egyebek mellett a következőket írja: „... a neutronfizikai vizsgálati módszereknek a molekuláris biológiában éppen úgy szerepük lehet, mint a magfizikában és a szilárdtestfizikában, ... de a csillagászatban is, ... láthatjuk, hogy intenzíven fejlődő tudományágról van szó...”

A 60-as évek végén megjelenő olajválság felgyorsította az atomerőművek fejlesztését, beleértve a fúziós kutatásokat is, amelyeket különösen a NAÜ támogatott. Ezekben a programokban a budapesti és a debreceni kutatók éveken át érdemlegesen vettek részt kutatási szerződésekkel és megbízásokkal. A 80-as évek közepe a neutronfizika „másodvirágzását” eredményezte, egyrészt a Paksi Atomerőmű üzembe helyezésével, másrészt Debrecenben az MGC-20 ciklotron telepítésével. Ez utóbbi a  $^2\text{H}(d,n)$  és a  $^9\text{Be}(d,n)$  reakciókra alapozott, változtatható energiájú neutronforrások üzemeltetésével jelentősen új alap- és alkalmazott kutatási témák művelését eredményezte. A ciklotron Debrecenbe történő telepítését az előkészítés és a döntés szintjén Pál Lénárd segítette elő, egyensúlyt teremtve ezzel a KFKI és az ATOMKI között a nagyberendezések elhelyezését illetően, ami egyben jelentősen hozzájárult a vidék kutatási infrastruktúrájának fejlesztéséhez is.

Az éppen 20 éve kifogástalanul üzemelő ciklotron a neutronfizika hazai és nemzetközi együttműködésekben történő művelésében döntő fordulatot jelentett. Sikeres, hosszú távú kapcsolatok jöttek létre a világ sok intézetével (főleg Európában, az USA-ban, Japánban) és nemzetközi szervezetekkel (úgy mint IAEA, CERN, JINR, INDC, EC-JRC IRRM, JSPS). A neutronforrásokat új detektálási és spektroszkópiai technikával kiegészítve érdemlegesen vehettünk és vehetünk részt az alábbi elvi és gyakorlati jelentőségű témák művelésében is:

1) A tiltott (pl. kábítószerek) és veszélyes anyagok (tapszóknak, robbanószerkezetek, nukleáris anyagok) észlelése [17]. Ismételtelen felmerült a neutrontdiffúziós és -reflexiós paraméterek ismeretének igénye a szállító konténerre és a komplex talajkörnyezetre [18, 19], továbbá a prompt hasadási neutronok multiplicitáseloszlási függvényének pontosítása a fontosabb aktinidákra az energia függvényében [20].

2) Kiterjedt, komplex közegek neutronaktivációs és prompt sugárzásos analízise, főleg a fosszilis energiahordozók esetén a H-, C-, N-, O-, S-, Cl-, Fe-, Ca-, Si-, valamint környezeti mintákban az As-, Cd-, Hg-, Pb-koncentráció meghatározása [21]. Az aktivációs analízist az utóbbi években kidolgozott neutronspektroszkópiai módszerek jól egészítik ki [22].

3) A kifolyási és a lokális neutronspektrumok mérésére kidolgozott módszerek (protonmeglökés [23], aktivációs küszöbdetektor [24]) a hasadási és fúziós reaktorok továbbfejlesztéséhez, illetve tervezéséhez szükséges differenciális és integrális neutronadatok meghatározásán túl, több tudományterületet és társadalmi jelentőségű fejlesztéseket egyaránt szolgálnak. Így például a hidrogénkoncentrációt és mélységi eloszlását egyaránt igényli

a nanotechnika, a fűtőanyagcella és más, hidrogénre alapozott energiaforrás fejlesztése.

4) A spallációs neutronforrások és a szubkritikus reaktorok kombinációja reményt ad a radioaktív izotópok olyan átalakítására, amely az energiatermelés mellett a hulladékok tárolási gondjait is jelentősen enyhítheti [25]. Ezen bonyolult rendszerekben kialakuló neutronspektrumok, valamint differenciális és integrális reakciósebességek modellezésére jó lehetőséget kínál a  ${}^9\text{Be}(d,n)$  reakcióban keletkező neutronok különböző kölcsönhatásainak vizsgálata. Az ATOMKI ciklotronjának felhasználásával első lépésként a Pb–Bi eutektikus elegyre alapozott spallációs céltárgy tervezéséhez kiterjedt (140 kg) Bi-minitára a kifolyási neutronspektrum meghatározása történt [26], ami lehetővé tette az ENDF/B-VI és más adatbázisra alapozott MCNP-4C számítások alkalmazhatóságának ellenőrzését.

5) A most jelentkező globális energiaválság előtérbe helyezi az alternatív energiaforrások kutatását, és ebben a termonukleáris reaktorok szerepét nem lehet mellőzni. Ennek köszönhető az ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) programról 2005 júniusában történt pozitív döntés.

A fenti vizsgálatokat hazai és nemzetközi szinten jól egészítik ki a Budapesti Kutató Reaktorra, valamint a BME Tanreaktorára alapozott sokrétű neutronfizikai kutatások.

## Irodalom

1. SIMONYI K.: *A reaktorfizika és reaktortechnika alapjai* – Bp. 1956.
2. LÉVAY A.: *Atomerművek* – Bp. 1956.
3. CSIKAI GY.: *Neutronfizika* – Bp. 1959.
4. ÁDÁM, G. KOSÁLY – KFKI Reports 6/1 (1958)
5. L. PÁL, L. BATA, I. KISS – Acta Phys. Hung. 10 (1959) 173
6. CSIKAI GY., DARÓCZY S. – Magy. Fiz. Foly. 7 (1959) 507
7. CSIKAI GY., DEDE K. – Magy. Fiz. Foly. 8 (1960) 1
8. J. CSIKAI, A. DARÓCZY, K. DEDE – J. Nucl. Energy 15 (1961) 204
9. K.H. BECKURTS, K. WIRTZ: *Neutron Physics* – Springer-Verlag, 1964, 370.
10. CSIKAI GY., SCHADEK J. – ATOMKI Közl. 3 (1961) 59
11. J. BACSÓ, J. CSIKAI, B. KARDON, D. KISS – Nucl. Phys. 67 (1965) 443
12. JÉKI L.: *KFKI* – Budapest, Arteria Studio, 2001.
13. BERECZ I., BORNEMISZA-PAUSPERTL P., NAGY J. – Magy. Fiz. Foly. 6 (1958) 431
14. E. KOLTAY – Acta Phys. Hung. 16 (1963) 93
15. KLOPPER E. – Informatika 7 (2004) 5
16. A. ÁDÁM, L. BOD, Z. SZABÓ, I. SZEGHŐ – Acta Phys. Hung. 12 (1960) 107
17. CSIKAI GY. – Fizikai Szemle 52/5 (2002) 146
18. J. CSIKAI, Cs.M. BUCZKÓ – Appl. Radiat. Isotopes 50 (1999) 487
19. J. CSIKAI, E. HUSSEIN, U. ROSENGARD – Appl. Radiat. Isotopes 61 (2004) 1
20. D.W. MUIR, M. HERMAN: *Long term needs for nuclear data development, INDC(NDS)-423* – IAEA, Vienna, 2001.
21. CSIKAI GY. – Fizikai Szemle 51/5–6 (2001) 169
22. J. CSIKAI, I. EL-AGIB – Nucl. Instrum. Methods A 432 (1999) 410
23. B. KIRÁLY, L. OLÁH, J. CSIKAI – Rad. Phys. Chem. 61 (2001) 781
24. I. SPAHN, S.M. QAIM, S. SUDÁR, J. CSIKAI – NEMEA, Report EUR 21100EN (2004) 122
25. *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles* – NEA, OECD 2002, France.
26. A. FENYVESI, L. OLÁH, J. JORDANOVA, J. CSIKAI (közlésre előkészítve).

# NEUTRONZAJ REAKTOROKBAN

Szatmáry Zoltán  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

## A transzportegyenlet

A reaktorokban megvalósuló hasadási láncreakció leírására általában a *transzportegyenletet* használjuk. Az egyenlet a neutronfluxusra vonatkozik, amelyet a következőképpen definiálunk:  $\Phi = vn$ . Itt  $v$  az  $E$  energiájú neutron sebessége,  $n$  pedig a neutronsűrűség a fázistérben, vagyis  $n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) dV dE d\Omega$  megadja azoknak a neutronoknak a számát a  $t$  időpontban, amelyek az  $\mathbf{r}$  pont körüli  $dV$  térfogatelemben találhatóak, energiájuk az  $(E, E+dE)$  intervallumba, sebességük iránya pedig az  $\Omega$  egységvektor körüli  $d\Omega$  térszögbe esik. A  $dV dE d\Omega$  mennyiséget a továbbiakban fázistérfogat-elemnek fogjuk nevezni. A transzportegyenlet fizikai tartalma rendkívül egyszerű, hiszen a neutronsűrűségre vonatkozó mérlegegyenlet:

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)}{\partial t} = \text{neutrontermelés} - \text{neutronfogyás.} \quad (1)$$

A jobb oldalon természetesen időegységre, továbbá egységnyi fázistérfogat-elemre vonatkozó mennyiségek állnak. A neutronok két módon tűnhetnek el: kifolyás és magreakciók révén. Ezek száma:

*Pál Lénárdnak ajánlva, 80-ik születésnapjára.*

$$\begin{aligned} \text{neutronfogyás} = & \Omega v \text{grad } n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \\ & + \Sigma_t(\mathbf{r}, E) v n(\mathbf{r}, E, \Omega, t). \end{aligned} \quad (2)$$

Itt  $\Sigma_t$  a teljes makroszkopikus hatáskeresztmetszet. Az első tag jelenti a kifolyást: a térfogategységből időegység alatt kidiffundáló és az oda bediffundáló neutronok számának a különbsége. A második tag pedig az összes magreakciók számát adja meg. Úgy tekintjük, hogy minden neutron eltűnik, amely magreakciót vált ki. Ezt fejezi ki (2) jobb oldalának második tagja. Helyettük azonban a magreakciók termelhetnek egy vagy több, más energiával és más irányban repülő neutronot. Ezek alkotják az (1) transzportegyenletben „neutrontermelés” kifejezéssel jelölt tag egy részét. Példák: maghasadás, rugalmas vagy rugalmatlan neutronszórás,  $(n, 2n)$  reakció stb. A másik részt a spontán hasadások vagy a korábbi hasadások termékei által termelt késő neutronok, illetve a neutronfluxustól független, úgynevezett külső neutronforrások alkotják. A példa kedvéért felírjuk a szóródásoknak megfelelő tagot:

$$\int_0^{\infty} dE' \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega\Omega') v' n(\mathbf{r}, E', \Omega', t). \quad (3)$$

A szórás magfüggvény fizikai jelentése a következő:  $\Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega, \Omega')$  annak a szórásnak a hatáske- resztmetszete, amelyben a szóródás előtt  $E'$  energiájú és  $\Omega'$  irányban repülő neutron a szóródás után az  $(E, E+dE)$  intervallumba eső energiával és az  $\Omega$  körüli  $d\Omega$  térszögbe eső irányban repül tovább. Hasonló integrálokkal fejez- hető ki a maghasadás, az  $(n, 2n)$  reakció stb.

A reaktorfizika alapfeladata a transzportegyenlet minél pontosabb megoldása. Ismeretes, hogy csak egészen idealizált esetekre vonatkozóan sikerült az egzakt megoldást megtalálni. Ezért a gyakorlatban különböző közelítő módszerekhez kell folyamodnunk. A transzportegyenlet- tel azonban nem csak ez a baj. Nyilvánvalóan maga is szenved egy alapvető hiányosságtól: nem tükrözi a láncreakció sztochasztikus jellegét, megelégszik a neutron- sűrűség várható értékének a leírásával. Jól tudjuk ugyanak- kor, hogy az (1) egyenlet jobb oldalán szereplő minden tag olyan folyamatnak felel meg, amely inherens módon a véletlentől függ. Erre legjobb példa a (2) alatti szórás integrál, ahol a szórás magfüggvény (osztva a szórás hatáske- resztmetszettel) nem más, mint a szóródás utáni neutronenergia és sebességirány valószínűségi sűrűség- függvénye. Önként adódik tehát, hogy a láncreakciót csak olyan elmélet írhatja le a maga teljes valóságában, amely az  $n$  neutron- sűrűséget valószínűségi változónak tekinti, és megadja ennek a szokásos valószínűség- elméleti jellemzőit. Az első ilyen elméletek és kísérletek az elektronikus zajok terén kialakult módszerekből indultak ki, ezért a jelenségkört *neutronzaj*nak nevezték el.

## Miért érdekes a neutronzaj?

A reaktorokban megfigyelhető fluktuációs jelenségeknek csak egyik fajtája a neutronzaj. Ha a láncreakció determi- nisztikus lenne, a reaktorba helyezett neutrondetektorok jelében akkor is találnánk fluktuációkat. Ennek az az oka, hogy a reaktor szerkezeti elemei is produkálnak fluktuá- ciókat: a hűtőközeg áramlásának a turbulenciája, hőmér- sékleti ingadozások, a fűtőelemrudak és a szabályozórudak rezgése stb. Mindez ahhoz vezet, hogy a transzport- egyenletben szereplő hatáske- resztmetszetek időben és térben fluktuálnak. Végeredményben a transzportegyen- let megoldása, vagyis a neutron- sűrűség is sztochasztikus lesz. Az ilyen természetű fluktuációkat *technológiai za- joknak* nevezzük. Tőlük való megkülönböztetésül tesszük ki a neutronzaj kifejezésben a „neutron” jelzőt. Az alábbiakban csak a neutronzajról lesz szó, ugyanis *Pál Lénárd* munkássága elsősorban erre a területre esik.

Mielőtt tovább mennénk, érdemes tisztázni, miért fon- tos a neutronzaj kutatása. Az első és legfontosabb ok az, hogy a láncreakció elmélete enélkül nem teljes. Gyakran veszélyes hibaforrás egy jelenségkört úgy vizsgálni, hogy nem veszünk tudomást annak minden jellegzetességéről, esetünkben a láncreakció sztochasztikus jellegéről. A más-odik ok gyakorlati: a neutronzaj kísérleti vizsgálata lehe- tővé teszi a reaktor számos fontos jellemzőjének (például a neutron-élettartam, a későneutron-hányad) mérését. Közbevetőleg megemlíthjük, hogy ez fokozottan igaz a technológiai zajokra: vizsgálatuk révén a reaktor rejtejt

meghibásodásait már akkor fel lehet deríteni, amikor még nem vezettek üzemzavarhoz.<sup>1</sup> Végül megjegyezzük, hogy az első atombomba készítői joggal tartottak attól, hogy a robbanó bombában meginduló láncreakció a fluktuációk miatt leáll, és a robbanás elmarad. Ezért a ne- utronzaj elméleti és kísérleti vizsgálata már az 1940-es években megindult. Az évek során számos elmélet és kí- sérleti módszer született, amelyek mindegyike a transz- portegyenletből kiinduló (tehát determinisztikus) és való- színűségi megfontolások keveréke volt. A konzekvensen valószínűségi elmélet végül Pál Lénárd munkássága ré- vén született meg az 1960-as évek elejére. Ennek alap- egyenlete a *Pál-Bell-egyenlet*, amely – speciális alkalma- zásként – tartalmazza a transzportegyenletet is.

## A neutronzaj heurisztikus elmélete

A fentiek megvilágítása érdekében először bemutatunk egy heurisztikus elméletet. Azon a tételen alapul, amely szerint ha egy magára hagyott (vagyis külső neutronfor- rást nem tartalmazó) reaktorba a  $t = 0$  pillanatban néhány neutront juttatunk, akkor egy bizonyos idő elteltével a neutronfluxus exponenciálisan fog változni:

$$\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) = e^{-\alpha t} \Phi_a(\mathbf{r}, E, \Omega). \quad (4)$$

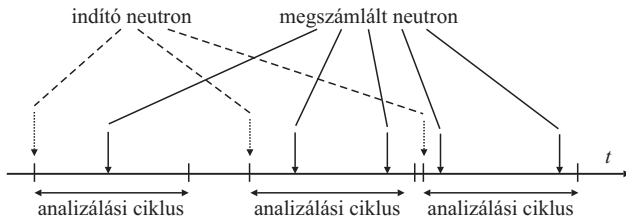
Könnyen meg lehet mutatni, hogy a transzportegyenlet- nek van ilyen alakú megoldása, amelyet számos reaktor- fizikai kísérletekben sikerült megfigyelni. Az  $\alpha$  időállandó kritikus állapotban zérus, szuperkritikus és szubkritikus állapotokban pedig pozitív, illetve negatív. A továbbiak- ban csak az utóbbiakkal foglalkozunk, amelyekben a (4) szerinti fluxus néhány  $\mu$ s alatt kialakul. A  $\Phi_a(\mathbf{r}, E, \Omega)$  flu- xust *alapl módus*nak nevezzük. Miután ez kialakult, a fluxus időfüggése a reaktor minden pontjában azonos, ezért ez a tér-, energia- és szögfüggéstől szétválasztható. Ezen alapul a reaktoroknak az úgynevezett *pontmodellje*, amely szerint a láncreakció leírásához a reaktort egyetlen pontnak tekintjük. Ezen a módon értelmezték az egyik első reaktorfizikai kísérletet, a *Rossi- $\alpha$  kísérletet*.

A Rossi- $\alpha$  kísérlet vázlata az *1. ábrán* látható. A reak- torba egy neutrondetektort helyezünk, amelynek a jeleit egy időanalizátorba küldjük. Az első detektált neutron elindítja az időanalizátort, majd a továbbiakat az érkező- sük pillanatának megfelelő csatornában megszámláljuk. Amikor az analízálási ciklus<sup>2</sup> befejeződött, az időanalizátor vár a következő indító neutronra, és egy újabb ciklus kez- dődik. A kísérlet értelmezéséhez szükségünk lesz még a *detektor  $\varepsilon$  hatásfokára*, amelyet a neutronzajok elméleté- ben másképp definiálunk, mint a nukleáris mérés-techni- kában szokás:

$$\varepsilon = \frac{N}{F}, \quad (5)$$

<sup>1</sup> Ezt a tudományágot nevezzük *reaktordiagnosztikának*.

<sup>2</sup> Analízálási ciklusnak azt az időtartamot nevezzük, amely alatt – az indítást követően – az időanalizátor a detektált neutronokat számlálja. Ha például az időanalizátor csatornaszélessége 10  $\mu$ s, és a csatornák száma 1024, akkor az analízálási ciklus hossza  $1024 \times 10 \mu$ s = 10,24 ms.



1. ábra. A Rossi- $\alpha$  kísérlet vázlatja

ahol  $N$  a *detektált neutronok*,  $F$  pedig az egész reaktorban történő *hasadások* száma. Mindkét mennyiség az időegységre vonatkozik. A nukleáris mérés technikájában a detektor határfoka az időegység alatt detektált neutronok száma osztva a detektor helyén fennálló *neutronfluxussal*. Az (5) szerinti  $\varepsilon$  zsel arányos, de egyéb tényezők is befolyásolják: függ a detektor helyén fennálló neutronfluxusnak és az egész reaktorban történő hasadások számának az arányától.

Legyen a tekintett analízálási ciklus kezdete a  $t_1$  időpont, és keressük annak a valószínűségét, hogy a  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumban a detektor egy további neutron jelez ( $t_2 > t_1$ ). Két eset lehetséges: (I) az utóbbi detektált neutron ugyanahhoz a hasadási lánchoz tartozik, mint az analízálási ciklust elindító neutron, vagy (II) egy attól független hasadási lánchoz. Az előbbi esetben *korrelált*, az utóbbi esetben pedig *korrelálatlan neutronokról* beszélünk.

Nézzük először, milyen valószínűséggel detektálunk egy korrelált neutronpárt.<sup>3</sup> A kezdeti időpontban legyen a reaktorban  $n$  számú neutron. A (4) képlet alapján ekkor  $t$  idő múlva  $e^{-\alpha t}$  számú neutron lesz a reaktorban. Az itt szereplő exponenciális tényezőt valószínűségként is értelmezhetjük: annak a valószínűsége, hogy egy neutronnak  $t$  idő elteltével még van utóda a reaktorban. Legyen  $t_0$  az az időpont, amikor az a hasadási lánc indult, amelyhez a korrelált neutronpár tartozik. Annak a valószínűsége, hogy a  $(t_0, t_0 + dt_0)$  intervallumban egy hasadás történik, és ebben a hasadásban  $\nu$  számú neutron keletkezik:

$$P_0 dt_0 = p_\nu F dt_0, \quad (6)$$

ahol  $p_\nu$  annak a valószínűsége, hogy a hasadásban  $\nu$  számú neutron keletkezik.

Keressük meg ezután annak a valószínűségét, hogy a  $(t_1, t_1 + dt_1)$  intervallumban  $\nu$  számú neutron *utódai* közül valamelyik jelet vált ki a detektorban. A mondottak szerint  $e^{-\alpha(t_1 - t_0)}$  annak a valószínűsége, hogy ezek egyike a  $t_1$  időpontban még van utóda. Ez  $\sum_f \nu dt_1$  valószínűséggel vált ki hasadást, amit  $\varepsilon$ -nal szorozva kapjuk a detektálás valószínűségét. Mivel  $\nu$  neutronnal indult a lánc, a keresett valószínűség

$$P_1 dt_1 = \nu e^{-\alpha(t_1 - t_0)} \varepsilon \sum_f \nu dt_1. \quad (7)$$

Hasonló megfontolással kapjuk annak a valószínűségét is, hogy a detektor a  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumban is jelez egy neutron jelet a láncból:

$$P_2 dt_2 = (\nu - 1) e^{-\alpha(t_2 - t_0)} \varepsilon \sum_f \nu dt_2. \quad (8)$$

Itt  $\nu$ -ből levontuk azt a neutron jelet, amelynek az utódját a  $dt_1$  intervallumban jelezte a detektor.

$P_1$  és  $P_2$  feltételes valószínűségek a  $P_0$ , illetve  $P_0$  és  $P_1$  feltételekkel, tehát a neutronpár detektálásának a valószínűségét a

$$dt_1 dt_2 \sum_\nu \int_{-\infty}^{t_1} P_0 P_1 P_2 dt_0 \quad (9)$$

képlet adja meg. A  $\nu$ -re való összegzés a  $\nu(\nu - 1)$  szorzatra vonatkozik:

$$\sum_\nu \nu(\nu - 1) p_\nu = \overline{\nu(\nu - 1)}.$$

Ezt a mennyiséget magfizikai kísérletekből ismerjük. Értéke  $^{235}\text{U}$ -ra 1,93. A (9) alatti integrál egyszerűen kiszámítható.

A korrelálatlan neutronpárok detektálásának a valószínűsége egyszerűen

$$(\varepsilon F dt_1) \cdot (\varepsilon F dt_2) = \varepsilon^2 F^2 dt_1 dt_2. \quad (10)$$

A (9) és (10) képleteket kombinálva kapjuk annak a valószínűségét, hogy a detektor egy neutronpárt jelezen a  $(t_1, t_1 + dt_1)$  és  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumokban:

$$P(t_1, t_2) dt_1 dt_2 = \varepsilon F [\varepsilon F + A e^{-\alpha(t_2 - t_1)}] dt_1 dt_2, \quad (11)$$

ahol  $A$  alkalmas állandó.

A (11) képlet alapján közvetlenül értelmezni tudjuk a Rossi- $\alpha$  kísérletet. Mindegyik analízálási ciklus a mindenkori  $t_1$  időpillanatban kezdődik. Az időanalízátor számára ez a kezdeti időpont. Ha az időanalízátor  $i$ -edik csatornája a  $t_i$  időpontban kezdődik és a csatornaszélesség  $\Delta t$ , akkor  $P(0, t_i) \Delta t$  adja meg annak a valószínűségét, hogy ebben a csatornában érkezik egy detektált neutron. Az  $i$ -edik csatornában mért  $N_i$  beütésszám Bernoulli-eloszlást követ, továbbá a különböző csatornákhoz tartozó beütésszámok statisztikailag függetlenek, hiszen elhanyagolható annak a valószínűsége, hogy egy analízálási ciklusban egynél több csatornában kapjunk beütést. Ennek alapján könnyen elvégezhetjük a mérés kiértékelését. Például az  $i$ -edik csatornában mért beütésszám várható értéke

$$M(N_i) = NP(0, t_i) \Delta t = a + b e^{-\alpha t_i}, \quad (12)$$

ahol  $a$  és  $b$  a (11) képlet alapján meghatározható paraméterek. Függvényillesztéssel tehát az  $\alpha$  időállandó a Rossi- $\alpha$  kísérletből meghatározható. Az így kapott érték – többek között – felhasználható a sokszorozási tényező mérésére.

A Rossi- $\alpha$  kísérletet leíró (11) egyenlet mutatja, hogy egy adott idő alatt detektált neutronok száma nem követi a részecskeszámlálásban általában megszokott Poisson-eloszlást. Ha ugyanis a detektált neutronok egymásutánja Poisson-folyamat lenne, akkor (12)-ben nem szerepelne az exponenciális tag. Ezen az észrevételen alapul a *Feynman-kísérlet*. A Poisson-eloszlás jellemzője, hogy egy tetszőleges  $\Delta t$  idő alatt detektált neutronok  $N(\Delta t)$  számának a szórásnégyzete egyenlő a várható értékével. Mivel reak-

<sup>3</sup> Annak a valószínűsége elhanyagolható, hogy egy korrelált neutronhármas, -négyest, ... detektálunk.

tor esetében az eloszlás más, várható, hogy a szórásnégyzet és a várható érték hányadosa 1-től eltér. Könnyen beláthatjuk, hogy ez valóban így is van.

Annak valószínűsége, hogy a  $(t_1, t_1 + dt_1)$  és  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumokban egy neutronpárt detektálunk, a (11) képlet szerinti  $P(t_1, t_2) dt_1 dt_2$ . Mivel végtelenül kicsi mennyiségről van szó, a párok száma csak 0 vagy 1 lehet. Emiatt  $P(t_1, t_2) dt_1 dt_2$  egyben megadja a párok számának a várható értékét is. Legyenek a  $(t_1, t_1 + dt_1)$  és  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumok a  $[0, \Delta t]$  intervallum részei. Ha a  $[0, \Delta t]$  intervallumban  $N$  számú neutronot detektálunk, közülük  $N(N-1)/2$  számú párt lehet képezni. E szám várható értékét megkapjuk, ha az összes lehetséges  $(t_1, t_1 + dt_1)$  és  $(t_2, t_2 + dt_2)$  intervallumokra összegezzük  $P(t_1, t_2) dt_1 dt_2$ -t:

$$M\left(\frac{N(N-1)}{2}\right) = \frac{M(N^2) - M(N)}{2} = \int_0^{\Delta t} dt_2 \int_0^{t_2} P(t_1, t_2) dt_1.$$

Ha figyelembe vesszük, hogy  $M(N) = \epsilon F \Delta t$ , továbbá az integrált (11) alapján kiszámítjuk, a következő eredményt kapjuk:

$$\frac{M(N^2) - M(N)^2}{M(N)} = 1 + \epsilon B \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha \Delta t}}{\alpha \Delta t}\right), \quad (13)$$

ahol  $B$  alkalmas, ismertnek tekinthető állandó. Ha ezt a mérést  $\Delta t$  különböző értékei mellett elvégezzük, szintén megkaphatjuk  $\alpha$  értékét. A levezetésből következik, hogy ez ugyanaz az időállandó, amelyet a Rossi- $\alpha$  kísérletből is megkaphatunk. A (13) képlet fontos jellegzetessége, hogy az 1-től való eltérés arányos a neutrondetektor  $\epsilon$  hatásfokával, ez ugyanis lehetővé teszi  $\epsilon$  mérését is. Ha  $\epsilon$ -t ismerjük, kiszámíthatjuk  $F$ -et, vagyis végső soron a reaktor teljesítményét.

## A Pál–Bell-egyenlet

Egyszerűsége folytán a Feynman-kísérletet már a reaktorfizika fejlődésének kezdetén is el tudták végezni, és értelmezni tudták, aminek alapján számos reaktorfizikai mennyiséget meg tudtak határozni. Ez illusztrálja a neutronzaj kísérleti vizsgálatának hasznosságát. Ugyanakkor a fenti gondolatmenet rávilágít arra, hogy az egész háttérben álló elmélet a láncreakció sztochasztikus jellegét csak nagyon hiányosan tükrözi. Valójában az elméletnek a következő mennyiségek, illetve események véletlen jellegét kellene tükröznie:

- a neutron által két ütközés között megtett út,
- az ütközésben bekövetkező magreakció fajtája (szóródás, befogás, hasadás stb.),
- ha szóródás, a szóródó neutron energiája ( $E$ ) és sebességének iránya ( $\Omega$ ),
- ha hasadás, a hasadásban keletkező neutronok száma ( $\nu$ ), mindegyikük energiája ( $E$ ) és sebességének iránya ( $\Omega$ ),
- és így tovább.

Ezen túlmenően az elméletben szereplő változóknak megfelelően definiált sztochasztikus folyamatot kell alkotniuk. Nyilvánvaló, hogy a bemutatott heurisztikus gondolatmenet ennek a követelménynek nem tesz eleget, mint ahogy a későbbi elméletek többsége sem. Végül megemlítjük, hogy a mérések értelmezésekor azt is figyelembe kell venni, hogy a neutronok detektálása véletlen mintavétel a reaktorban található neutronokból, vagyis a neutrondetektorban keletkező jelsorozat egy *másodlagos* sztochasztikus folyamat.

Az elmélet vázlatos ismertetéséhez először a vizsgált mennyiségeket kell definiálnunk. Egy neutron jellemzésére a fázistérben értelmezett  $\mathbf{u} = \{\mathbf{r}, \mathbf{v}\}$  vektort használjuk, ahol  $\mathbf{r}$  a neutron helykoordinátája és  $\mathbf{v}$  a sebességvektora. Az utóbbi megadására a fentiekben az  $E$  energiát és az  $\Omega$  sebességirányt használtuk, ezért a továbbiakban is ehhez tartjuk magunkat. A fázistérnek a reaktorhoz tartozó része úgy adódik, hogy  $\mathbf{r}$  végigfut a reaktor teljes térfogatán,  $E$  a  $(0, +\infty)$  intervallumban,  $\Omega$  pedig a teljes  $4\pi$  térszögben változik. Ezt felosztjuk az  $U_1, U_2, \dots$  diszjunkt részhalmazokra.  $\xi(t, U)$ -val jelöljük a  $t$  időpontban az  $U$  fázistérfogatban található neutronok számát. A fentiekben ennek a véletlen függvénynek a várható értékét jelöltük  $n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) dV dE d\Omega$ -val, ahol  $U = dV dE d\Omega$ .

Az elmélet feladata a  $\xi(t, U)$  sztochasztikus folyamat jellemzőinek a meghatározása. Bevezetjük a következő mennyiséget:  $p[t_0, \mathbf{u}; t, n]$  annak a valószínűsége, hogy  $\xi(t, U) = n$ , feltéve, hogy a  $t_0$  időpontban a fázistér  $\mathbf{u}_0$  pontjába egy neutron került. A kitűzött feladatot tulajdonképpen végre is hajtjuk, ha ezt a valószínűséget meghatározzuk, pontosabban, felírjuk a rá vonatkozó egyenletet. Nos, a Pál–Bell-egyenlet ennek a generátorfüggvényét adja meg:

$$g(t_0, \mathbf{u}_0; t, z) = \sum_{n=0}^{\infty} p[t_0, \mathbf{u}_0; t, n] z^n. \quad (14)$$

Emlékeztetünk arra, hogy az  $\mathbf{u}_0$  vektor az  $(\mathbf{r}_0, E_0, \Omega_0)$  változók együttes jelölése. Itt nem részletezhető levezetések alapján ez a generátorfüggvény kielégít egy, az (1) transzportegyenletre nagyon is emlékeztető egyenletet:

$$\frac{\partial g(t_0, \mathbf{u}_0; t, z)}{\partial t_0} =$$

a neutrontermelésnek megfelelő tagok –

a neutronfogyásnak megfelelő tagok.

A neutronfogyásnak megfelelő tagok alakja megegyezik a (2) egyenletben látható tagokkal:

$$a \text{ neutronfogyásnak megfelelő tagok} = \Omega_0 v_0 \text{ grad } g(t_0, \mathbf{u}_0; t, z) + \Sigma_t(\mathbf{r}_0, E_0) v_0 g(t_0, \mathbf{u}_0; t, z). \quad (16)$$

Az itt szereplő grad operátor az  $\mathbf{r}_0$  változóra hat. A neutrontermelésnek megfelelő tagok lényegesen bonyolultabbak. Csak a neutronszórásnak megfelelőt írjuk fel, hogy látszon a (3) képlettel való analógia:



$$\int_0^{\infty} dE' \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s(\mathbf{r}_0, E_0 \rightarrow E', \Omega_0, \Omega') v_0 g(t_0, \mathbf{r}_0, E', \Omega'; t, z). \quad (17)$$

A hasadásnak megfelelő tag lényegesen bonyolultabb, ugyanis annak a neutronok energiájának és sebességirányának véletlen jellegén túlmenően a hasadásban keletkező neutron számának véletlen jellegét is ki kell fejeznie. Ezért ennek alakja lényegesen eltér a transzport-egyenletben szereplő alaktól.

Megjegyezzük még, hogy hasonló egyenletet lehet felírni a kétszeres, háromszoros stb. valószínűségek generátorfüggvényére is. Például a kétszeres valószínűséget a következőképpen definiáljuk:  $p^{(2)}[t_0, \mathbf{u}; t, n_1, n_2]$  annak valószínűsége, hogy  $\xi(t, U_1) = n_1$  és  $\xi(t, U_2) = n_2$ , feltéve, hogy a  $t_0$  időpontban a fázistér  $\mathbf{u}_0$  pontjába egy neutron került. Ennek a valószínűségnek az ismeretében tanulmányozni lehet – többek között – a fázistér különböző térfogataiban található neutronok száma közötti korrelációt.

## Záró megjegyzések

Már negyedik évtizede annak, hogy a Pál–Bell-egyenlet alkalmas kiindulást jelent a neutronzaj területén folyó elméleti és kísérleti kutatásoknak. Segítségével *ad hoc*

ötletek és mindenféle egyszerűsítő feltevések nélkül értelmezni lehet a neutronzaj kísérleti vizsgálatára szolgáló módszereket. Például a Rossi- $\alpha$  módszer alapjául szolgáló (11) képletben szereplő  $A$  együttható értékét a heurisztikus elméletek olyan pontatlanul adják meg, hogy a mérésből kapott értéke nem interpretálható. Hasonló állítást lehet tenni a többi (itt nem említett) zajmérésről is.<sup>4</sup> Ugyanakkor a Pál–Bell-egyenlet alkalmazása jól értelmezhető mennyiségekre vezet.

Ezen túlmenően a (15)–(17) egyenletek nemcsak a klasszikus transzportelméletet tartalmazzák, hanem annál jóval többet is. (14)-ből ugyanis látható, hogy a generátorfüggvény  $z$  szerinti deriváltja a  $z = 1$  helyen megadja a  $\xi(t, U)$  valószínűségi függvény várható értékét. Ha tehát a Pál–Bell-egyenletet  $z$  szerint deriváljuk, majd benne  $z = 1$ -et helyettesítünk, akkor egyszerűen kaphatunk az (1) klasszikus transzportegyenletnek megfelelő egyenletet. Ha azonban a Pál–Bell-egyenletet  $z$  szerint kétszer deriváljuk, majd benne  $z = 1$ -et helyettesítünk, akkor a  $\xi(t, U)$  valószínűségi függvény szórásnégyzetére vezethetünk le egyenletet. Ez már határozott többlet a klasszikus transzportelmülethez képest, amelynek a keretén belül egy ilyen egyenlet levezetése szóba sem jön.

<sup>4</sup> Ez alól talán egyetlen kivétel a Feynman-módszer (13) egyenletében szereplő  $B$  együttható: ez a heurisztikus elméletek szerint is értelmezhető információt tartalmaz a késő neutronok hányadára vonatkozóan.

# A LAKÓTÉRI RADONSZINT ELOSZLÁSÁRÓL

Tóth Eszter, Hámori Krisztián  
RAD Labor, Boronkay, Vác

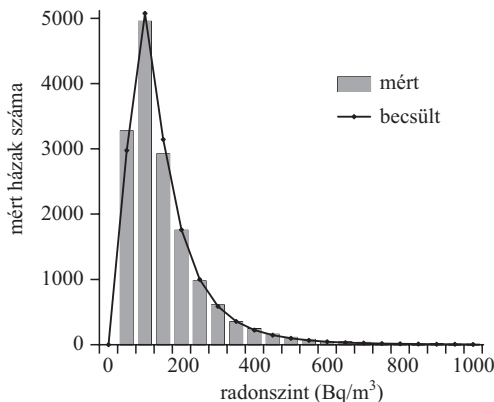
A radon megjelenése lakásainkban általában természetes jelenség. A szoba levegőjének radonsűrűsége elsősorban azon múlik, mennyi rádium (urán) van a talajban, amire a ház épült. (A radon a rádiumból születik  $\alpha$ -bomlással.) Ugyanakkor igen sok más tényező befolyásolja, hogy végül is mekkora koncentrációban tapasztaljuk a radont.

A legtöbb szerző feltételezi, hogy a radon aktivitáskoncentráció nagyon sok, kicsiny és egymástól független véletlen mennyiség szorzata. Tehát – mondják – a különböző házakban mért radon aktivitáskoncentrációk lognormál eloszlást követnek. További következtetéseiket erre az úgynevezett *lognormál modellre* alapozzák. S valóban, gyakori, hogy egy-egy területen mért néhány tucat, néhány száz, sőt, néha néhány ezer lakás radonszintjének eloszlását a lognormál eloszlások családjába tartozónak sejtetik a nemzetközi szakirodalomban. Alkalmanként megvizsgálják, hogy  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszinten teljesül-e például a  $\chi^2$ -próba, legtöbbször azonban nem is utalnak erre, csupán a *GM* geometriai közép és a *GSD* geometriai standard deviációt adják meg. Pedig egy

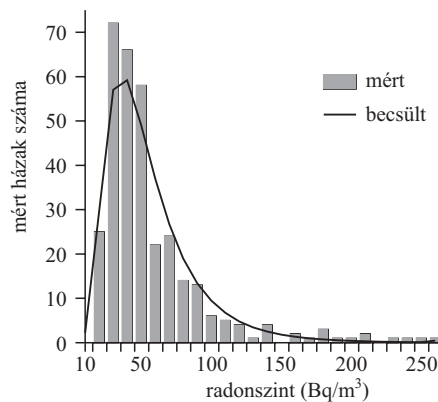
Pál Lénárdnak ajánlva, 80-ik születésnapjára.

véletlen mennyiségről csak akkor bizonyítható, hogy lognormál eloszlást követ, ha az nagyon sok, azonos eloszlású, egymástól független véletlen változó szorzataként állítható elő. Sem annak a fizikai hátterét nem látjuk, hogy e sok véletlen tényező (mondjuk például a talaj porozitását jellemző vagy a szoba önszellőzését leíró) azonos eloszlású lenne, sem azt, hogy ezek a véletlen mennyiségek függetlenek és szorzódóak lennének.

A lognormál modell alkalmazhatósága iránti vágy azonban érthető. Feltételezzük, hogy a vizsgált területen vagy/és a vizsgált szerkezetű házak lakásai közül a még nem mértek radonszintjei hasonló eloszlást követnek a mértekéhez. Ekkor az illesztett lognormál eloszlás két paraméterének becsült értékével ( $m'$  és  $\sigma'$ ) megadható az adott radonszint fölött lévő házak számaránya. Ezt lehet azután kockázatbecslésekhez felhasználni, e számokkal lehet azután megnyugtani vagy riogatni a helyi lakosokat. Sőt, általuk lehet az országról radontérképet készíteni. De ily módon lehet megadni egy, az országra „jellemző” *GM*-et (mérési középértéket) és *GSD*-t (geometriai standard deviációt), amit azután nemzetközi szervek évről évre összesíthetnek, és tájékoztató jelleggel a döntéshozókhöz eljuttathatnak.



1. ábra. A mért 15 602 lakás légtérének radonszint-eloszlása. Az oszlopok a mért lakások számát, a folytonos vonal az illesztett lognormál eloszlást mutatják.



2. ábra. A mért 325 emeleti lakás légtérének radonszint-eloszlása. Az oszlopok a mért lakások számát, a folytonos vonal az illesztett lognormál eloszlást mutatják.

A RAD Labor által az ország területén mért, több mint 15 000 lakótéri radonszint felhasználásával az alábbiakban bemutatjuk a lognormál modellel való közelítés lehetőségeit.

## Lakótéri radonadatainkról

Amikor *radonszint*ről beszélünk, a radon aktivitáskoncentrációnak az *éves átlagára* gondolunk. A mérés azonban nem egy teljes évig tartott, a detektorokat csupán három évszakra: őszre, télre és tavaszra helyeztük el a lakásokban. A nyári értéket ezekből becsültük két különböző évben, közel ezer lakásban mért teljes év (négy évszak) mérései alapján. A méréseket CR39 nyomdetektorral végeztük. A helyi általános iskolás tanárok és diákok segítettek a detektorok elhelyezésében.

1994 és 2004 között 423 település összesen 15 602 lakásában határoztuk meg a radonszintet. A mérési pontok (a lakások hálósobái) nem egyenletesen fedik le az ország területét. Mintavételünk abban az értelemben véletlenszerű volt, hogy a települések tanárai „véletlenszerűen” jelentkeztek mérésre. Másrészt, amelyik településen már az első mérési évben találtunk nagyobb radonszintet, ott a következő években további lakásokban is mértünk. Mintavételünk tehát nem reprezentatív. (A tényleges radonszint kialakulásának nagyon sok összetevője miatt reprezentatív mintán történő mérés elvégzését gyakorlatilag kivitelezhetetlennek tartjuk.)

## Csoportosítások

A mért 15 602 adathoz a *maximum likelihood* módszerrel megbecsültük az  $m'$  és  $\sigma'$  paramétereket, amelyekkel lognormál függvényt illesztettünk a mért eloszláshoz (1. ábra). A látvány gyönyörű! Mintha ráöntötték volna! Pedig a mért adatok eloszlása nem tartozik a lognormál eloszlások családjába. A  $\chi^2$ -teszt  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszintet megkívánva elveti hipotézisünket az adatok lognormál eloszlásáról.

A szakirodalom zöme azt állítja, ha a csoport (sztrátum) homogén, azaz geológiai, házszerkezeti szempont-

ból a lakások nem különböznek lényegesen (?), akkor alkalmazható a lognormál modell. (A kérdőjel arra utal, hogy a lényeges különbözőségnek általában nincsen pontos definíciója. Legtöbbször akkor mondják, hogy nincs lényeges különbség, ha sikerült lognormál eloszlást illeszteni a megkívánt szignifikanciával.) Szétválogattuk tehát az adatokat három szempont szerint.

A radon móltömege közel 7,5-szerese a levegő átlagos móltömegének. Így a radongáz – hasonlóan a széndioxidhoz – inkább a talaj közelében marad. A földszinten lévő szobákban ezért lényegesen több radon várható, mint az emeleteken. Emiatt volt az a mérési stratégiánk, hogy csak földszinten mérünk, emeleteken nem. De a kisdíjak szerencsére kíváncsiak. A 15 602 adat közül 325 emeleti hálósoba adata volt. Az emeleti szobák radonszint-eloszlása pedig lognormál eloszlást követ:  $m' = 3,71$ ,  $\sigma' = 0,59$  (a 95%-os konfidenciaintervallumok rendre 3,67–3,75 és 0,54–0,64). A megfelelő  $GM = 41 \text{ Bq/m}^3$ , illetve  $GSD = 1,8 \text{ Bq/m}^3$  (2. ábra és 1. táblázat 1. adatsora).

A földszinti 15 277 lakás mért radonszintjének eloszlására azonban még mindig nem alkalmazható a lognormál

1. táblázat

	Adott radonszintet meghaladó lakások becsült százalékos számaránya			
	150 Bq/m <sup>3</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	400 Bq/m <sup>3</sup>	600 Bq/m <sup>3</sup>
emeleti lakások*	1,39	0,36	0,0058	0,0003
nagyvárosi, földszintes lakások**	7,58	3,80	0,52	0,12
városi, földszintes lakások**	15,93	8,11	0,99	0,22
falusi, földszintes lakások**	22,12	11,79	1,63	0,41
összesen Magyarországon***	11,50	5,90	0,78	0,19

\* 100% a magyarországi emeleti lakások teljes száma: 1 648 251

\*\* 100% a vizsgált területek földszinti lakásainak a száma: a nagyvárosokban (1 773 369), a városokban (523 390) és a falvakban (1 417 832)

\*\*\* 100% a vizsgálatlalt érintett magyarországi területek teljes lakásszáma: 3 767 135 (az összes hazai lakás 92%-a)



3. ábra. Magyarország felosztása olyan tájegységekre, amelyeken mért radonszint-adatokhoz a lognormál eloszlás illesztését a  $\chi^2$ -teszt nem veti el.

modell. Mérési eredményeinkből és a szakirodalomból tudtuk, hogy az alapincézetlen lakásokban (ahol a szoba aljzata érintkezik a radonforrást jelentő talajjal), általában nagyobb radonszint mérhető, mint az alapincézett lakásokban. Radonmérő országjárásaink tapasztalata, hogy minél kisebb a település, annál gyakoribbak a nem alapincézett házak. (Állításunkat igazoló statisztikai feldolgozás a mért házakról felvett adatlapok alapján folyamatban van.) A földszinti lakásokat tehát szétválogattuk *nagyvárosokra* (lakók száma több mint 100 000), *városokra* (10 000–100 000 lakos) és *falvakra* (10 000-nél kevesebb lakosú községekre és kisvárosokra). Sem a nagyvárosi 818 mérési eredmény, sem a városi 2838 mérési eredmény, sem a falvak 11 621 eredménye nem követ lognormál eloszlást.

Ha azonban a *nagyvárosok* mért eloszlásait külön-külön, településenként vizsgáltuk, a  $\chi^2$ -teszt  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszinten megengedte a lognormál modell használatát. Ekkor az egyes nagyvárosok esetében megbecsültük, hogy hány ház várható adott radonszint fölött. E számokat összeadtuk, majd a statisztikai évkönyv adataiból becsült földszinti nagyvárosi lakások számához viszonyítottuk (1. táblázat 2. adatsora).

Ezután a még nem elemzett városok és falvak nagy száma (53 és 364) elriasztott attól, hogy egyesével vizsgáljuk meg, alkalmazható-e a lognormál modell. Az országot területekre bontottuk, többé-kevésbé geográfiai szempontból (3. ábra).

Hamis lenne az az állítás, hogy első pillanattól kezdve a 3. ábrán mutatott felosztást használtuk. Nem. Először nagy tájegységeket választottunk. Közülük csupán a Kisalföld „viselkedett rendesen”: a mérési adatok eloszlása a lognormál családba tartozott. A többi nagy tájegységet tovább kellett bontanunk. A felbontást addig végeztük, amíg nem kaptunk lognormál eloszlást a  $\chi^2$ -teszt szerint  $\alpha = 0,05$  szignifikán-

2. táblázat  
A mért radonszintek csoportosítási szempontjai

emelet/ földszint	településtípus	geográfia	sztráta
emelet	minden fajta	egész ország	sztrátum 1
földszint	nagyvárosok	Budapest	sztrátum c1
		... Szeged	... sztrátum cn
	városok	Nagyalföld	sztrátum t1
		... Vas–Zalai-dombság	... sztrátum tk
		... Mecsek	... sztrátum tn
		falvak	Nagyalföld
... Vas–Zalai-dombság	... sztrátum vk		
... Mecsek	... sztrátum vn		
X falu	sztrátum vx		

ciaszinten. A Sajó–Hernád-völgnél például ki kellett vennünk egy községet, és külön vizsgálni, mert így, külön-külön, lognormál eloszlásokhoz jutottunk, együtt viszont nem. E geográfiai–geológiai szempont volt a harmadik csoportosítás alapja (2. táblázat).

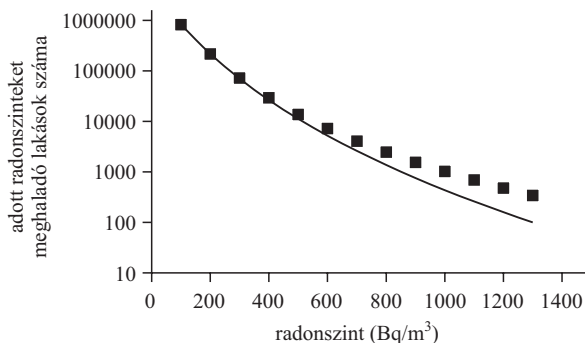
## Lakótéri radonszint-eloszlás Magyarországon

Miután az összes mérési eredményt olyan csoportokba válogattuk szét, amely csoportokban (sztrátumokban) a mérési eredmények a lognormál eloszlások családjába tartozónak volt mondható, a becsült  $m'$  és  $\sigma'$  paraméterekkel valamint a KSH-adatok segítségével csoportonként megbecsültük, hány lakásban valószínűsíthető adott ér-

3. táblázat  
A magyarországi falvak adott radonszintet meghaladó földszinti lakásainak becsült százalékos\* számaránya régióként

geográfia	régió	150 Bq/m <sup>3</sup>	200 Bq/m <sup>3</sup>	400 Bq/m <sup>3</sup>	600 Bq/m <sup>3</sup>
síkság	Nagyalföld	17,75	8,45	0,67	0,09
	Mezőföld	24,82	12,08	0,93	0,12
	Kisalföld	22,85	11,87	1,27	0,22
dombság	Vas–Zalai-dombság	7,51	2,42	0,05	0,00
	Északi dombság	24,69	12,52	1,16	0,17
	BST-dombság	26,09	14,49	1,94	0,40
mészkö	Vértes–Dunazug-hegység	16,21	7,12	0,43	0,05
	Bakony	21,26	10,73	1,04	0,17
	Bükk	36,35	21,13	2,91	0,57
	Mecsek	43,13	29,98	8,50	3,09
vulk.–mészkö	Börzsöny–Cserhát	51,35	36,27	10,04	3,42
vulkanikus	Mátra	50,70	36,84	11,73	4,58
gránit	Mórágai rög	46,88	30,59	6,17	1,64
	Velencei-hegység	36,75	24,69	6,46	2,25
üledék	Sajó–Hernád-völgye (–X)	39,81	25,30	4,99	1,32
	X falu	77,96	61,88	20,43	6,85

\* 100% az adott régiók földszinti lakásainak száma



4. ábra. A földszinti lakások radonszintjeinek becslt, félempirikus, kumulatív eloszlása. A négyzetek a területenként becslt, majd összesített lakások számát, míg a folytonos vonal az illesztett lognormál eloszlást mutatják.

téknél nagyobb radonszint. A 10 ezernél kisebb lélekszámú települések esetén bemutatjuk, hogy e lakások száma hány százaléka az adott területen lévő összes földszinti lakásnak (3. táblázat).

A 3. táblázatban feltüntetünk geográfiai, geológiai utalásokat is. További, főként geológiai kutatások segítése a célunk. A síkságokon, dombvidékeken, mészkő-hegységeken épült kistelepüléseken általában kisebb arányban várhatóak nagyobb radonszintű házak. Egyes kutatók szeretik kiemelni, hogy a gránitrögökön, a gránithegységekben várható sok radon a házakban. Nekünk egy folyóhordalékra épült Sajó–Hernád-völgyi település „vitte el a pálmát”. De geológusokkal közös és részletekbe menő kutatás feladata lesz majd az is, hogy vajon a mátrai települések vagy a Börzsöny esetében milyen speciális hidrotermális folyamatok dúsították fel egyes területek talajában az uránt, hiszen a vulkáni eredetű, illetve magmás kőzetekre nem jellemző általában a nagy urán-koncentráció. Jól látszik az eredményekből például az a geológiai tény, hogy a Velencei-hegység és a Mórágai rög gránitja nem azonos típusú: míg a Mórágai rög településeinél a közepesen nagy radonszintű házak vannak többen, addig a 600 Bq/m<sup>3</sup> fölött valószerűsíthető lakások számaránya inkább a Velencei-hegységben nagyobb.

A városok és a falvak csoportjaira tehát külön-külön megbecsültük az adott értéknél nagyobb radonszintű földszinti lakások számát. (Az adott csoportban létező összes földszinti lakás számát a KSH adattárából vettük.) Ezután – hasonlóan a nagyvárosoknál követett eljárásához –

összeadtuk az így kiszámított számokat külön a városok, illetve a falvak esetére, s megnéztük, hogy a városok, illetve falvak összes földszinti lakásának hány százalékat teszik ki ezek az összegek (1. táblázat 3. és 4. adatsora). Ugyanezt az eljárást alkalmaztuk az egész ország (nagyvárosi, városi és falusi) földszintes házaira is. Természetesen nem adtunk becslést azon csoportokra, ahol nem volt elegendő mérési eredményünk ahhoz, hogy a  $\chi^2$ -teszttel ellenőrizni tudjuk a lognormál eloszlás elfogadhatóságát. Ezekben a területeken van a magyarországi lakások 8%-a.

A mért 15602 adat alapján a fenti eljárással a hazai lakások 92%-ának radonszint-eloszlására tudunk következtetni. A földszinti 15277 mérési eredményből becslt, országos, kumulatív eloszláshoz megkíséreltünk lognormál eloszlást illeszteni (4. ábra). A  $\chi^2$ -teszt  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszinten ezt a hipotézist nem engedte.

A maximum likelihood módszerrel azonban bármilyen eloszlású adathalmazhoz (azaz nem lognormál esetben is) kiszámolható a mértani közép és a geometriai standard deviáció. Annak ellenére, hogy az 4. ábrán (sötét négyzetekkel) bemutatott eloszlás nem tartozik a lognormál eloszlások családjába (legalábbis  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszintet megkövetelve), mégis kiszámítottuk ezeket a paramétereket:

$$GM = 82 \text{ Bq/m}^3 \quad \text{és} \quad GSD = 2,0 \text{ Bq/m}^3.$$

Óva intünk azonban bárkit attól, hogy ezekből a paramétereiből kockázatbecslés érdekében megbecsülje a 600 Bq/m<sup>3</sup> vagy annál nagyobb radonszintek fölött lévő magyarországi otthonok számát. Amint azt az 4. ábrából látjuk, ezzel a lognormál függvényvel alábecsülné a nagy radonszintű házak számát.

Meggondolandó, hogy az országot jellemezhetjük-e az egyes sztrátumokhoz megbecsült  $m'$ , illetve  $\sigma'$  paramétereknek a sztrátumhoz tartozó lakásszámokkal súlyozott átlagával. Ezekre a földszinti lakások esetében

$$GM = 83 \text{ Bq/m}^3 \quad \text{és} \quad GSD = 1,9 \text{ Bq/m}^3$$

adódott, míg az összes magyarországi lakás 92%-ára

$$GM = 61 \text{ Bq/m}^3 \quad \text{és} \quad GSD = 1,8 \text{ Bq/m}^3.$$

Mindazt, ami a cikkben a statisztikai elemzéssel kapcsolatos, Pál Lénárdtól tanultuk. Köszön(t)jük!

## VERSENGŐ TÁRSULÁSOK

Szabó György  
MTA MFA

Az utóbbi években a tudomány különböző területein felgyorsult és kiszélesedett a fizika módszereinek alkalmazása. Ez a folyamat részben annak köszönhető, hogy ezek a sikeres fizikai módszerek alapozták meg a mai fejlett technológiákat, és ezáltal fontos szerepet játszottak életvitelünk gyökeres megváltoztatásában. Másrészt, a mérés- és számítástechnika gyors fejlődése mindenütt lehetővé tette a jelenségek pontosabb vizsgálatát és nu-

merikus szimulálását, ami egyúttal lendületet adott a térbeli matematikai modellek vizsgálatának is a biológia, a közgazdaságtan és a viselkedéskutatás területén. A felsorolt tudományterületek közös vonása, hogy számos jelenségkör leírásának matematikai hátterét a térbeli evolúciós játékelmélet szolgáltatja.

A legegyszerűbb térbeli evolúciós játékelméleti modellben a játékosokat egy négyzetrács pontjain helyezzük



el. Ebben az esetben a négyzettrács szerepe csupán annyi, hogy az elsőszomszéd-kapcsolatok definiálják azt, hogy melyik játékos kivel játszhat. A szereplők egyéni jövedelme a szomszédok közötti játékokból származik. A játék nyereseményét mindkét játékos befolyásolhatja azzal, hogy a lehetséges döntések (stratégiák) közül melyiket választja. A játékelmélet neve magában foglalja játékosaink azon törekvését, hogy mindegyikük a lehető legnagyobb nyereseményt kívánja elérni az adott szabályok mellett. A klasszikus játékelmélet [1] módszereket kínál arra, hogy az intelligens játékosaink a lehetséges nyeresemények (más szóval a nyereséymátrix) ismeretében megtalálhassák a számukra legkedvezőbb döntést. Ezzel szemben, az evolúciós játékelméletben [2–4] a játékosok egyszerűen átveszik (megtanulják) a sikeresebb szomszéd stratégiáját. Ez a darwini evolúciós szabály jól jellemzi az állatok, emberek, illetve embercsoportok viselkedését.

A biológiai fajok közötti kölcsönhatás is jellemezhető egy nyereséymátrixszal, amely az utódlétrehozás képességére (fitnesz) kifejtett hatást számszerűsíti. Ekkor a stratégiát maga a faj testesíti meg. A legegyszerűbb „kölcsönhatás” esetén a ragadozó megeshi a zsákmányt, és annak helyén hátrahagyja a saját utódját. Szolidabb kölcsönhatások és finomított evolúciós szabályok bevezetésével bonyolult ökológiai rendszerek is modellezhetővé válnak.

Ma már viszonylag sokat tudunk a kevés szabadsági fokkal jellemezhető rendszerek viselkedéséről. A jól megkevert rendszerekben például a Lotka–Volterra-típusú modellek számot adnak a fajok egyensúlyi sűrűségéről vagy akár a sűrűség oszcillálásáról is. A kevés fajjal rendelkező térbeli modelleknél kielégítő pontossággal ismerjük a térbeli hatások következményeit. Jóval kevesebbet tudunk az olyan sokfajú rendszerek viselkedéséről, ahol a rövid távú kölcsönhatás és a fluktuációk miatt az egyedek általában nem érezhetik a számukra optimális (sokfajú) környezetet, mivel hatótávolságukon belül csak néhány faj tartózkodhat. E modellek tipikus tulajdonsága, hogy számos olyan részlegesen stabil megoldással rendelkeznek, melyek a fajok egy részének létét tételezik fel. A térbeli modellekben ezek a fajtársulások spontán módon jönnek létre és alkotnak változó méretű tartományokat. Ezek a térbeli társulások egymással is versengenek, és a határok mentén befolyásolhatják egymás térbeli szerkezetét (és ezen keresztül a működését is). A sikeresebb társulás területet hódít el versenytársától. Mivel a lehetséges társulások száma általában jóval meghaladja a fajok számát, ezért (az evolúciós szabályoktól függően) gyakran alakul ki ciklikus dominancia a társulások között, amely egy állandóan változó (önszervező) térbeli szerkezeten keresztül társulások (és fajok) sokaságát képes életben tartani.

Egy 1947-es cikkében *Alex S. Watt* [5] számos megfigyelt növényi társulás példáján keresztül mutat rá arra, hogy egyes ökológiai rendszerek térben és időben állandóan változó mintázattal rendelkeznek. Más szóval, találtak olyan rendszereket, amelyekben a fajtársulás összetétele térben és időben (többé-kevésbé) periodikusan változik. Természetesen már akkor felmerült annak lehetősége, hogy ez a viselkedés jóval általánosabb és egyúttal

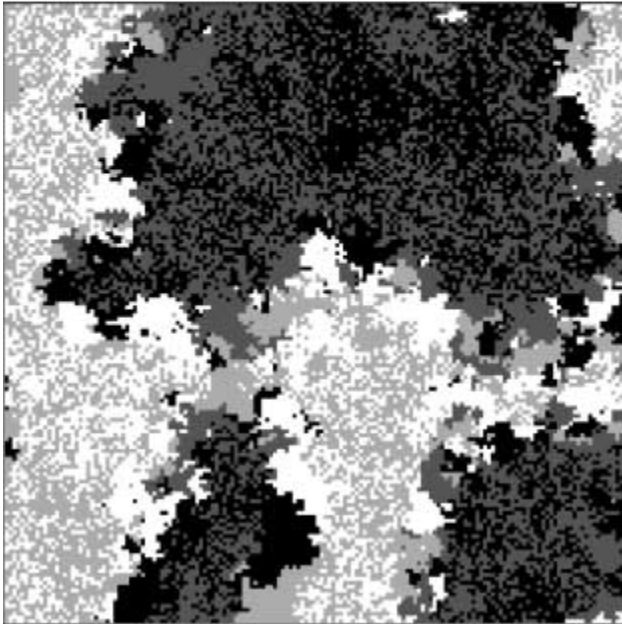
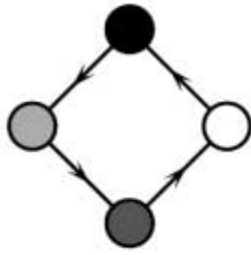
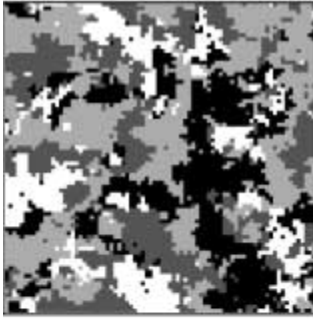
sokszínűbb annál, mint amit a korai példák sejtene engedtek. A statisztikus fizikában az úgynevezett bozóttűz-modellek [6] adnak számot arról, hogy három állapot (növekvő fa, égő fa és hamu) ismétlődik ciklikusan térben és időben. A továbbiakban ennél jóval összetettebb folyamatokat kívánunk tanulmányozni.

A jelenségek bemutatására és tanulmányozására egy látszólag nagyon leegyszerűsített modellt választottunk. El kell azonban mondani, hogy az eredeti, négyfajú, ciklikus ökológiai modellben a fajok egyedei egy (folytonos) síkon bolyongtak, és ha látókörükbe került egy zsákmány, akkor azt megették, és az így nyert táplálék révén utódot hagytak hátra. Ez a sokparaméteres modell ugyanolyan jellegű állapotokat és állapotváltozásokat mutatott, mint a következő fejezetben ismertetett modell. Más szóval, itt is érvényesül az univerzalitás elve, amely lehetővé teszi, hogy a lényeges folyamatok pontosabb megismerése érdekében a vizsgálatokat a lehető legegyszerűbb modellekre korlátozzuk.

## Négyfajú ciklikus ragadozó–zsákmány modell

A ciklikus ragadozó–zsákmány modellek háromfajú változatát egy rácson *Tainaka* [7] vezette be 1988-ban. A modell négyfajú változatában négy faj egyedei helyezkednek el egy négyzettrács pontjain. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy minden rácspontban egy egyed található, vagyis a fajok térbeli eloszlásának leírására használhatjuk a négyállapotú Potts-modell formalizmusát [8], ahol az  $i$ -ik rácspont állapotváltozója ( $s_i = 1, 2, 3, 4$ ) arra utal, hogy melyik faj egyede tartózkodik az adott helyen. A négy faj ciklikus ragadozó–zsákmány viszonyban van egymással, vagyis az 1-es faj ragadozója a 2-esnek, amely ragadozója a 3-asnak, amely ragadozója a 4-esnek, s amely ragadozója az 1-esnek (és ezzel a kör bezárult). A fajok térbeli eloszlásának változását a már említett ragadozó–zsákmány kölcsönhatás vezérli. Az elemi folyamat során a modellben véletlenül kiválasztunk két elsőszomszédos rácspontot, és ha ott egy ragadozó és zsákmánya található, akkor a zsákmány eltűnik, és a helyét elfoglalja a ragadozó utódja. Semmi sem történik, ha a két kiválasztott rácspontban ugyanazon faj egyedei találhatók. Ezzel szemben, ha a két különböző faj semleges (pl. 1 és 3, vagy 2 és 4), akkor  $X$  valószínűséggel megengedjük a helycseréjüket. Modellünkben ez a folyamat teszi lehetővé a keveredést, és egyúttal ennek erőssége ( $X$ ) a modell egyetlen paramétere [9].

Nyilvánvaló, hogy ez a modell számítógépes szimulálásra teremtett. Egy véletlen kezdőállapotból indítva a rendszert a szimulációk segítségével meghatározhatjuk az átmeneti folyamatok után kialakuló egyensúlyi (stacionárius) állapotok tulajdonságait, mint például a fajok átlagos gyakoriságát (más szóval sűrűségét), a ragadozó–zsákmány párok valószínűségét, a fajok térbeli eloszlását jellemző korrelációs távolságokat stb. A látványos információt azonban a fajok térbeli (itt kétdimenziós) eloszlásának időbeli változása szolgáltatja, amelyet a számítógép képernyőjén könnyedén megjeleníthetünk.



1. *ábra.* Az alsó pillanatfelvételt a fajok eloszlását mutatja a négyzet rácson a négyfajjas ciklikus ragadozó–zsákmány modellben a kétféle védelmi szövetség térbeli szétválása során ( $X = 0,05$ ). A bal felső pillanatfelvételt a négy faj eloszlását mutatja az önszervező mintázatban  $X = 0$ -nál, amelyet a ciklikus invázió tart állandó változásban úgy, hogy közben a mintázat tipikus (átlagos) geometriai tulajdonságai változatlanul maradnak. A táplálékhálón (a jobb felső sarokban) jelöltük a ragadozó–zsákmány viszonyt és a fajok színét.

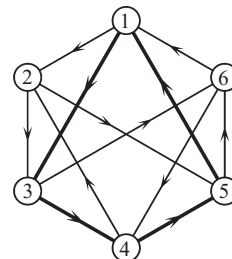
Az 1. *ábra* két pillanatfelvételt mutat. A kisebbik *ábra* egy olyan tipikus térbeli eloszlást ábrázol, amelyik a keveredés nélküli esetben ( $X = 0$ ) jellemzi az állapotot. Itt kisméretű tartományokat láthatunk, amelyeket kétféle határ választhat el egymástól. Egy ragadozó területét a zsákmánya területétől elválasztó határvonal egy átlagos inváziós sebességgel halad. Ezzel ellentétben a semleges fajokat elválasztó határvonal változatlan marad mindaddig, amíg valamelyik inváziós front bele nem ütközik. Az inváziós frontok mozgása állandó változásban tarja ezt az önszervező mintázatot, amelyben a ciklikus szimmetria miatt a négy faj azonos átlagos sűrűséggel ( $c = 1/4$ ) jelenik meg.

Alacsony  $X$  értékek esetén a keveredés hatása alig vehető észre. Mindössze a semleges fajokat elválasztó határvonal mentén figyelhetjük meg a határvonal érdesedését, illetve a semleges fajok egymás területére való behatolását. Egy küszöbérték felett ( $X > X_c = 0,0236$ ) ez a folyamat már képessé válik két, kétfajjas, jól elkevert, térbeli állapot kialakítására. Erre mutat példát az 1. *ábra* nagyobb méretű pillanatfelvétele.

A páratlan, illetve a páros sorszámú fajok jól összekeveredett állapotát tekinthetjük a két faj védelmi szövetségének, mivel a fajok ebben a térbeli szerkezetben képesek kölcsönösen megvédeni egymást a külső támadókkal szemben. Például, ha az 1-es és 3-as fajok jól összekevert tartományának határán az egyik 1-es fajhoz tartozó egyed helyét kívülről elfoglalja egy 4-es egyed, akkor a szomszédságában lévő 3-as egyed rövid időn belül visszatámad. Hasonlóan védik meg a 3-as egyedet a szomszédos 1-esek a 2-es faj egyedeinek támadásával szemben. A modell szimmetriája miatt természetesen a 2-es és 4-es faj védelmi szövetsége is ugyanígy képes védeni magát. Más szóval, ebben a modellben két ekvivalens védelmi szövetség létezik, melyek  $X > X_c$  esetén növekvő méretű tartományokat hoznak létre. A tartományok átlagos (lineáris) mérete az idő négyzetgyökével arányosan növekszik, ugyanúgy, ahogyan az történik az Ising-modellben (a kritikus hőmérséklet alatt), és a valóságban megfigyelt számos rendeződési folyamatban is. A doménnövekedés következtében egy véges rendszerben előbb-utóbb csak a két védelmi szövetség egyikét fogjuk látni, és ebben az állapotban a túlélő két faj aránya már nem fluktuál. A szimulációs eredmények egy elsőrendű állapotváltozásra utalnak  $X_c$ -nél, ha változtatjuk az  $X$  értékét.  $X_c$  alatt a négyfajjas, ciklikus invázióval fenntartott önszervező állapotot figyelhetjük meg, míg  $X_c$  felett a két védelmi szövetség valamelyikébe fejlődik a rendszer. Természetesen a két végállapot azonos valószínűséggel jöhet létre.

A modell egyszerűsége nemcsak a szimuláció, hanem az analitikus módszerek alkalmazása szempontjából is előnyös. A hagyományos átlagtér-közelítés például megjósolja az említett (stacionárius) állapotok létezését a homogén állapotokkal együtt. Nyilvánvaló, hogy ez az átlagtér-közelítés nem jósolhat állapotváltozást, mivel a keveredés hatását képtelen figyelembe venni. A kifinomultabb párközelítés már képes számba venni a keveredés hatását, de az állapotváltozásról nem tud számot adni. Ezen átlagtér-közelítések pontosságát növelhetjük azzal, ha nemcsak az egy- és kétpontos konfigurációk valószínűségét számítjuk ki, hanem a rácspontok nagyobb méretű fűrtjein is meghatározzuk az összes lehetséges konfiguráció valószínűségét. Ennél a modellnél  $3 \times 3$ -as fűrtméretre kellett kiterjeszteni ezt a módszert, hogy az állapotváltozás létezését analitikusan is igazolni lehessen. Ez a tény arra utal, hogy az elméletileg lehetséges stacionárius állapotok egymással szembeni stabilitását a rövid távú korrelációk bonyolult szövevénye határozza meg.

2. *ábra.* A hatfajjas modell táplálékhálóját. A sorszámokkal címkézett körök a fajokat képviselik, az élek ragadozó–zsákmány párokat kötik össze, a nyilak a ragadozótól a zsákmány felé mutatnak.



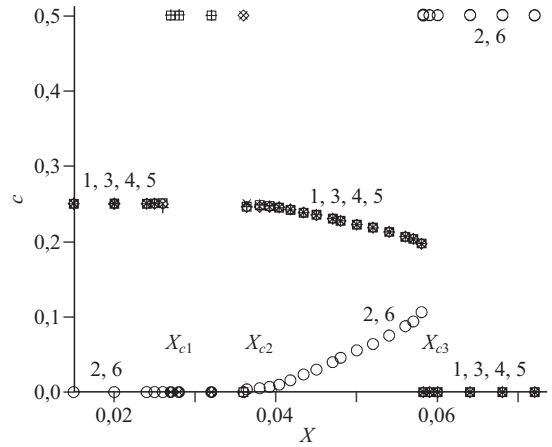
Ebben a modellben a védelmi szövetségek kialakulását a semleges fajok keveredése biztosította. Valószínűleg sok más olyan mechanizmus létezik, amelyik egy-két lehetséges társulást előnyhöz juttat a többiekkel szemben. A következő fejezetben egy olyan modell vizsgálunk, ahol két különböző mechanizmussal működő védelmi szövetségek és egyéb társulások versengése határozza meg a rendszer stacionárius állapotát.

## Egy hatfajos ciklikus ragadozó–zsákmány modell

Az előző fejezet négyfajos modelljét sokféleképpen általánosíthatnánk. Most azt a változatát vizsgáljuk, ahol a négy faj helyett hat lesz, azaz ( $s_i = 1, \dots, 6$ ). Feltételezzük továbbá, hogy mindegyik fajnak két ragadozója és két zsákmánya van olyan módon, ahogy azt a 2. ábra táplálékhálója jelzi. Ez azt jelenti, hogy például az 1-es faj utódai elfoglalhatják a szomszédos rácspontot, ha ott éppen egy 2-es vagy 3-as fajhoz tartozó egyed tartózkodik, vagy  $X$  valószínűséggel helyet cserélhet a véletlenül választott szomszédjával, ha az a 4-es fajhoz tartozik.

A táplálékhálón vastagabb élekkel és nagyobb nyilakkal jelöltük a ragadozó–zsákmány viszonyt az 1-, 3-, 4-, és 5-ös faj között. Ennek az az oka, hogy ez a négy faj ciklikus védelmi szövetséget alkot ebben az esetben. Ha csak ez a négy faj van jelen, akkor ez a rendszer megegyezik az előző négyfajos modellel, és emiatt a keveredés nélküli esetben ( $X = 0$ ) ugyanolyan önszervező állapotba fejlődik, mint amelyet az 1. ábra kisebbik pillanatfelvétele képvisel. Ez a sajátos térbeli szerkezet eredményezi a védelmet a külső (2-es vagy 6-os fajhoz tartozó) támadókkal szemben. Ha ugyanis egy ilyen tartomány határán a társulás valamelyik tagját megtámadja a külső ragadozója, akkor annak belső ragadozója rövid időn belül eltünteti a támadót, mivel az egyúttal ragadozója a külső támadónak is. Emiatt a véletlen kezdőfeltételtől indított simulációk során a rendszerből kihál a védelmi szövetséggel szemben gyengének bizonyuló 1-es és 6-os faj, és minden egyéb lehetséges társulás is alulmarad a versengésben, ha a rendszer mérete nagy. Kisméretű simulációk esetében (a kezdőfeltételtől és a véletlen számok generálásától függően) megeshet, hogy egy másik háromfajos (pl. 2 + 3 + 4) vagy négyfajos (pl. 1 + 2 + 5 + 6) ciklikus társulás, vagy akár valamelyik egyfajos (pl. 1) homogén, illetve két semleges faj (pl. 1 + 4) keveréke fogja uralni a végső stacionárius állapotot. Nagyobb méretek esetén mindegyik ilyen társulás hosszabb vagy rövidebb ideig jelen lehet a rendszerben. Elegendően nagyméretű rendszer esetében, azonban mindig a négyfajos, ciklikus védelmi szövetség kerül ki győztesként a társulások versengéséből.

Hasonló a helyzet akkor is, ha a  $X$  értéke nagyon alacsony. Amint azt az előző fejezetben részleteztük, a túlélő négyfajos ciklikus állapot instabillá válik, ha  $X$  értéke meghalad egy küszöbértéket ( $X > X_c = X_{c1}$ ). Ilyenkor alakulnak ki és alkotnak egyre növekvő tartományokat a semleges párok jól elkevert állapotai (1 + 4 és 3 + 5). Vegyük észre, hogy ezek a tartományok ideális „vadászme-



3. ábra. A fajok átlagos sűrűsége ( $c$ ) a semleges párok helycseréjének valószínűsége ( $X$ ) függvényében. A nyilak az állapotváltozások helyét jelzik.

zők” a 2-es vagy 6-os faj számára. Például, a 2-es faj akadálytalanul hódíthatja meg azt a területet, ahol csak 1-es és 4-es faj tartózkodik. Ez súlyos következményeket von maga után, ha  $X > X_{c2}$ . Ekkor ugyanis a szétválási folyamat gyorsabb lehet, mint a 2-es és 6-os fajok kihalása, amelyek életben maradását (táplálását) éppen ezek a tartományok segítik. Emiatt létezik egy tartomány, ahol egy nagyon sajátos, önszervező mintázat kialakulása biztosítja mind a hat faj életben maradását.

Ha  $X_{c2} > X > X_{c3}$  [ $X_{c2} = 0,035(?)$ ,  $X_{c3} = 0,058$ ] akkor az (1 + 3 + 4 + 5) négyfajos ciklikus védelmi szövetség egy jellegzetes időállandóval szétbomlik a semleges párokból álló tartományokra [(1 + 4) + (3 + 5)], amelyeket kialakulásuk után gyorsan meghódít a 2-es vagy a 6-os faj. Az ilyen módon létrejött homogén tartomány is instabil, mivel mindegyik fajnak van két ragadozója. Emiatt a homogén tartományok helyén nagyon gyorsan jönnek létre a ciklikus invázióval működő társulások, melyek közül a négyfajos, ciklikus védelmi szövetség kerül ki győztesként. Ez a folyamatsorozat ismétlődik hasonlóan ahhoz, ahogyan az a bozóttűz-modelleknél történik. Ennél a hasonlatnál a 2-es és 6-os faj terjedése hasonlít a tűz terjedésére, amelyet a helycsere mértéke befolyásol azzal, hogy a meghódítható területek milyen gyorsan képződnek újra. Ha a keveredés mértéke meghaladja a harmadik küszöbértéket, akkor a 2-es és 6-os faj táplálása, és ezzel együtt az elfoglalt terület mértéke is olyan mértékben növekszik, hogy esetenként a tartományok összeérnek, és ekkor kialakul a 2-es és 6-os faj keveréke, amely az adott körülmények között már stabilabb a versenytársainál.

A stabil állapotokat és az egymást követő állapotváltozások sorát mutatja be a 3. ábra. Pontosabban, ezen az ábrán a stacionárius állapotokra jellemző összetételt (fajok sűrűségét) ábrázoltuk az  $X$  függvényében. Jól látható, hogy négyféle állapotot, és ennek megfelelően három állapotváltozást figyelhetünk meg akkor, amikor növeljük az  $X$  értékét. Az ábra alapján az első és a harmadik állapotváltozás elsőrendű. A második átmenet minősítését és ezzel együtt a kritikus pont értékének pontos meghatározását (erre utal a kérdőjel a becslést érték mellett) a harmadik tartomány elején a nem kiháló fajok (1, 3, 4 és 5) sűrűségében kialakuló óriási mértékű fluktuáció akadályozza.

További három olyan hatfajos modell létezik, ahol mindegyik fajnak két-két ragadozója, illetve zsákmánya van. Ezek a modellek egymástól is erősen különböző viselkedést mutatnak [9]. A terjedelmi korlátok miatt nem ismertetjük a részleteket, mivel e modellvizsgálatok általános üzenete már a fenti példák alapján is összegezhető.

## Általános tanulságok

A statisztikus fizikában az Ising- és Potts-modelleket [8] tekintjük a térbeli rendeződési folyamatok leírására kifejlesztett legegyszerűbb modelleknek. A rendeződési folyamatokban megmutatkozó univerzalitás biztosítja számunkra azt a lehetőséget, hogy az állapotváltozás általános tulajdonságai szempontjából lényegtelennek minősülő részletektől megszabadítsuk a matematikai modellt, és a legegyszerűbb modell vizsgálatán keresztül alkossunk pontosabb képet a rendeződési folyamat általános tulajdonságairól és az azt befolyásoló ismérvekről (pl. szimmetriákról). Ezt a szemléletmódot érvényesítettük a fenti modellek kifejlesztésénél és vizsgálatánál. Ennek egyik következménye az, hogy nincsenek olyan valóságos ökológiai rendszerek, amelyekről azt állíthatnánk, hogy az általunk vizsgált, leegyszerűsített térbeli ragadozó–zsákmány modellekkel kielégítően adhatunk számot a viselkedésükről. Minden hiányosság ellenére, ezek a sokfajos modellek már képesek voltak felmutatni olyan jelenségeket, amelyek kifejezetten az (élő) ökológiai rendszerekre jellemzőek. Ilyen tulajdonság például a sokszínűség (*bio-diverzitás*) fennmaradása egy önszervező mintázaton keresztül, amelyet a fajok társulásai közötti versengés tart mozgásban. A hatfajos modell vizsgálata világosan mutatta, hogy a társulások között fellépő ciklikus dominancia képes életben tartani a legtöbb fajt. Ezeket a társulásokat tekinthetnénk akár önálló fajoknak, amelyek sajátos térbeli szerkezettel és működési mechanizmussal rendelkeznek. Ez a szemlélet természetesen összemosza a különb-

segeket a rész és az egész (faj és fajtársulás), illetve a mikroszkopikus és makroszkopikus működési mechanizmusok között. Ugyanakkor ez a megközelítés sugallja azt, hogy a társulások is alkothatnak magasabb rendű (térben kiterjedtebb) társulásokat, és ez az elbonyolódási folyamat természetesen folytatódhat a magasabb szinteken is.

A vizsgált modellek a térbeli evolúciós játékelméleti modelleknek azt a tulajdonságát ragadják meg, hogy ezekben a sokfajos rendszerekben nagyon sok stacionárius állapot létezik, mivel figyelembe kell vennünk a részrendszer (itt a fajok egy része hiányzik) lehetséges stacionárius állapotait is. A lehetséges stacionárius állapotok a fluktuációk következtében spontán módon alakulnak ki, majd ezt követően a térbeli társulások (és részeik) közötti versengés határozza meg a végeredményt. A társulások közötti erőviszony természetesen függ az evolúciós (dinamikai) szabályoktól, így azok változ(tat)ása markáns állapotváltozásokhoz vezethet. A fenti modellek vizsgálata során szembesülni kellett néhány olyan állapotváltozással is, amelyek eltérnek attól, amit az eddig ismert univerzalitási osztályok képviselnek a fizikában. Röviden, ezen a területen még számtalan feladat vár a statisztikus fizikai szemléletmód érvényesítésére, és ennek megemlékezésével visszajutottunk e cikk nyitó gondolatsorához.

## Irodalom

1. J. VON NEUMANN, O. MORGENSTERN: *Theory of Games and Economic Behaviour* – Princeton University Press, Princeton, 1944.
2. J. MAYNARD SMITH: *Evolution and the theory of games* – Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
3. H. GINTIS: *Game Theory Evolving* – Princeton University Press, Princeton, 2000.
4. M.A. NOWAK, R. MAY – Int. J. Bifur. Chaos 3 (1993) 35
5. A.S. WAIT – J. Ecol. 35 (1944) 1
6. K. SCHENK, B. DROSSEL, F. SCHWABL – Phys. Rev. E 65 (2002) 026135
7. K. TAINAKA – Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 2688
8. Y.F. WU – Rev. Mod. Phys. 54 (1982) 235
9. G. SZABÓ, G.A. SZNAIDER Phys. Rev. E 69 (2004) 031911
10. G. SZABÓ – J. Phys. A: Math. Gen. 38 (2005) 6689–6702 [arXiv:q-bio.PE/0408005]

# LÉTEZIK-E A KOZMIKUS CENZOR?

Rácz István  
MTA KFKI RMKI, Elméleti Főosztály

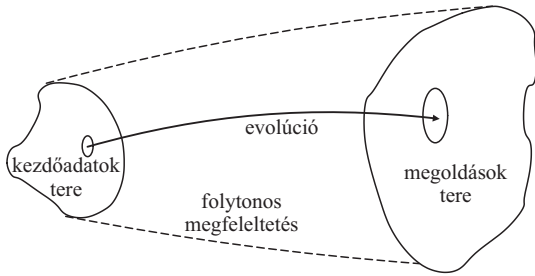
Az általános relativitáselmélet – vagy ahogy szintén hivatkozhatunk rá, az Einstein-féle gravitációelmélet – a klasszikus fizika utolsó nagy átfogó elmélete. Kétségtől mentesen klasszikus abban az értelemben, hogy a kvantumfizika eszköztárára semmilyen formában nem épít. A klasszikus jelző azonban furcsán is hat, hiszen ez az elmélet alapjaiban rázta meg a korábbi térről és időről kialakított elképzeléseinket. A teret és az időt egymásba ötvözte, és egy merőben új fogalommal, a görbült téridővel helyettesítette. Az általános relativitáselméletben még Shakespeare híres „színház az egész világ” kijelentése is teljesen új megvilágításba kerül, hiszen itt maga a színpad is „szereplővé”, azaz dinamikai objektummá válik. Az általános relativitáselmélet nem csupán az anyag történetének egy-

szer és mindenkorra rögzített geometriai háttéren történő leírására vállalkozik, hanem a modern fizika elvárásaival is összeegyeztethető, kísérletek által nagyon meggyőzően alátámasztott új modelljét kínálja az anyag és geometria kölcsönös meghatározottságának.

Az elmélet klasszikus jellegét szeretném még inkább hangsúlyozni az alábbi néhány *prediktív* képességére utaló eredmény felidézésével.<sup>1</sup> Bár az elmélet lényegében 1916-ban végleges alakjában megszületett, a ötvenes

<sup>1</sup> A klasszikus értelemben vett prediktív képességen azt értem, hogy az alaptörvényekre alapozva (legalábbis elvileg) az összes megfigyelhető fizikai mennyiséghez, bármely pillanatban, akár egyidejűleg is egy-egy határozott értéket rendelhetünk.





1. ábra. Az evolúció folytonos, azaz a fejlődési egyenletek bármely kezdőadat-rendszer elegendően kicsiny környezetében fekvő ponthoz az eredeti kezdőadathoz tartozó megoldáshoz közel eső megoldást feleltet meg.

évek elejéig kellett várni, míg az Einstein-egyenletek hiperbolikus fejlődési egyenletek formájában is felírásra kerültek [1]. Ez technikailag a térváltozók megfelelő kirostálása, mértékrögzítés<sup>2</sup> révén érhető el. A vonatkozó vizsgálatok fontos következménye az, hogy alkalmasan megválasztott kezdőadatokhoz – a fejlődési egyenleteknek megfelelően – egyértelmű evolúció, azaz Cauchy-fejlődés<sup>3</sup> tartozik. Továbbá, ez a megfeleltetés *folytonos* és *kauzális* módon történik.

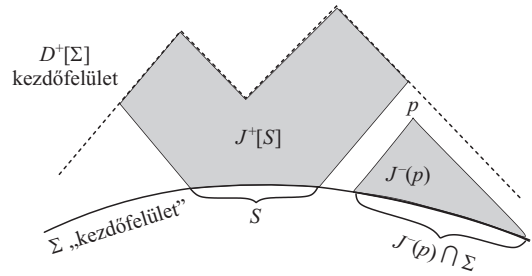
Az evolúció folytonos abban az értelemben, hogy a kezdőadatok kicsiny megváltoztatása révén maguk a megoldások is csak kis mértékben módosulnak (1. ábra). Itt a *kicsiny* jelzőnek mindkét esetben az adott függvénytereken értelmezett és ott megfelelően megválasztott norma segítségével adhatunk értelmet. Világos, hogy önmagában az egyértelműség vajmi keveset érne a folytonosság tulajdonsága nélkül, hiszen a kezdőadatokat – bármely fizikailag releváns szituációban – csak bizonyos pontossággal tudjuk meghatározni.

Ezenfelül a fejlődés kauzális is abban az értelemben, hogy amennyiben a kezdőadatokat a kezdőfelületnek csak valamely valódi részalmazán változtatjuk meg, akkor a változás hatása nem jelenik meg az adott tartomány kauzális jövőjén kívül (2. ábra). Ennek egyik fontos következménye az, hogy a fejlődés bármely  $p$  pontjában a fizikai mezők aktuális értéke a kezdőfelületnek csak  $p$  kauzális múltjába eső részén (ezt  $J^-(p)$  jelöli a 2. ábrán) megadott adatoktól függ. Érthetően az evolúció kauzális jellege szintén elvi fontossággal bíró tulajdonság, hiszen általa a hatás terjedési sebességének végsősségére vonatkozó alapfeltevésünk adaptációjának helyessége válik ellenőrizhetővé.

Mivel az általános relativitáselméletben megfogalmazható evolúciós, pontosabban fogalmazva Cauchy-probléma rendelkezik a fenti tulajdonságokkal, a klasszikus elméletek minden prediktív képességével fel van vértezve. Az általános relativitáselmélet azonban olyannyira prediktívnek bizonyult, hogy – egyes szerzők szóhasználatát

<sup>2</sup> Ezen eljárás ismertetésére itt nem szándékozom külön kitérni. A vonatkozó részletek után érdeklődő olvasó viszonylag rövid áttekintést találhat például a [2, 3] munkákban. (Itt: mérték = *gauge* a szakszóhasználatban.)

<sup>3</sup> A hiperbolikus egyenletekre vonatkozó kezdőérték-problémát a matematikusok nagyon sokszor Cauchy-feladatnak is nevezik. Ennek megfelelően az Einstein-féle gravitációelméletben elterjedt az a szóhasználat, hogy a kezdőérték- (vagy Cauchy-) probléma megoldásaként kapott téridőt Cauchy-fejlődésnek nevezzük.



2. ábra. Az evolúció kauzális.  $J^-(p) \cap \Sigma$  felületnek a  $p$  pont kauzális múltjába eső részét, azaz  $\Sigma$ -nak a  $p$  pontból múlt irányú időszerű vagy fényserű görbe mentén elérhető részét jelöli. A  $\Sigma$  felületen megadott kezdőadatok jövő Cauchy-fejlődését  $D^+[\Sigma]$ -val jelöltük. Egy  $S \subset \Sigma$  korlátos és zárt részalmazon megadott adatok csak az  $S$  halmaz kauzális jövőjében,  $J^+[S]$ , lehetnek hatással a mezők ottani aktuális értékére.

átvéve – saját érvényességének határait is viszonylag hamar rámutatott. Ezen negatív értelmű kijelentés magyarázatoként az alábbi észrevételekre szokás hivatkozni:

- Léteznek olyan téridők, amelyekben geometriai szingularitások jelennek meg.
- Vannak olyan téridők, amelyekben még a maximálisnak választott kezdőfelületek lehető legnagyobb Cauchy-fejlődése sem teljes.

## Szingularis téridők

A fizikailag reális téridők igen széles osztályai – melyek elemei például kozmológiai modelleket vagy éppen gravitációs összeomlások átmenő csillagokat írnak le – tartalmaznak geometriai szingularitásokat [4–9]. Ezekre a szingularitásokra általában úgy gondolhatunk, mint azokra a bizonyos helyekre,<sup>4</sup> amelyekhez közelítve például a téridő görbülete, vagy rajta keresztül valamely fizikai mennyiség extrém módon viselkedik, felrobban. Szeretném azonban hangsúlyozni, itt nem egyszerűen csak valamely fizikai mennyiség válik szingularissá. Maga a téridő geometriája nem folytatható *ott* tovább. Bizonyos értelemben a geometriai szingularitások jelentik meg a világtörténések összességének a peremét.

A köztudatban a vonatkozó reakcióknak az alábbi két fő típusa ismert. A kutatók nagyon nagy többsége úgy vélekedik, hogy a geometriai szingularitások nemkívánatos velejárói az általános relativitáselméletnek, és hogy az Einstein-elmélet kvantált változata szabadít meg majd minket azoktól. Azt várják, hogy a klasszikus megoldásokban megjelenő extrém geometriai viselkedések eltűnnek, vagy legalábbis a kvantált elmélet nyilvánvalóvá teszi majd azt, milyen új fizika használandó a nagyon erősen görbült téridő-tartományokban. A kutatók jóval kisebb hányada mondja azt: „Miért kellene attól kétségbe esni, hogy az elmélet bizonyos megoldásai szingularitásokat tartalmaznak? Fogadjuk el inkább azt a pozitívista megközelítést, hogy a szingularitások – az ismert fizikai feltételek mellett – kialakulhatnak, és folytassuk tovább vizsgálatainkat az Einstein-elmélet keretein belül mindad-

<sup>4</sup> Ennek a bizonyos „helynek” a pontos meghatározása önmagában is tisztességes előkészítést igényelne, melyre ezen dolgozat keretei között nem vállalkozhatunk.

dig, amíg a szingularitások létezéséből kiindulva nem jutunk valamely feloldhatatlan ellentmondáshoz.”

Valójában bizonyos analógia fedezhető fel a téridő-szingularitások és például a folyadékokban kialakuló lökéshullámok leírása során megjelenő szingularitások között. Az, hogy a folyadékok esetében az elmélet által megjósolt extrém viselkedés nem figyelhető meg, azzal magyarázható, hogy a folyadék modellezésénél alkalmazott kontinuumhipotézis használhatósága megszűnik a molekuláris méretekhez közeledve. Egyszerűen más a folyadék „szövege” a releváns tartományban. Ki tudja, hogy a mi téridő-kontinuum feltevésünk milyen körülmények között és hogyan válik alaptalanná?

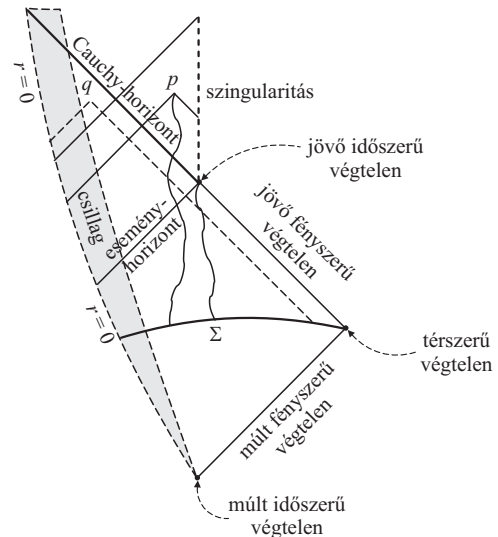
Bár az utóbbi kérdésre vonatkozó kielégítő válasz nem ismeretes, a fenti két megközelítés valamelyike mindenki számára kínál olyan kompromisszumot, amely – még ha csak ideiglenesen is – enyhítheti a téridő-szingularitások megjelenéséhez kapcsolódó kényelmetlenségérzetünket.

## Nem teljes Cauchy-fejlődések

Egy kicsit aggasztóbb a maximális Cauchy-fejlődések inkomplettiségének problematikája. Ismertek ugyanis olyan téridők – például a Reisner–Nordström-, Kerr- és a Taub–NUT-téridők ilyenek –, amelyekben az adott problémával kompatibilis és lehető legnagyobb Cauchy-felületen megadott kezdőadatok maximális Cauchy-fejlődése nem teljes, azaz a téridő az Einstein-egyenleteket is tiszteletben tartó módon folytatható az evolúciós tartományon túlra. A Cauchy-fejlődés határa, a Cauchy-horizont<sup>5</sup> ráadásul véges sajátidő alatt elérhető bizonyos megfigyelők számára, ugyanakkor a geometria teljesen regulárisan viselkedik a határon és annak környezetében. Ez speciálisan az elektromosan töltött csillag gravitációs összeomlását leíró téridő esetében azt jelenti (lásd a 3. ábrát),<sup>6</sup> hogy a  $\Sigma$  felületen – amely a csillag közepétől a térszerű végtelenig bezárólag mindent magában foglal – megadott kezdőértékek ismeretében csak az ábrán jelzett Cauchy-horizontig határozható meg például az, mit olvashatnak le mérőeszközökről az egyes megfigyelők. Mihelyt ezt a határt eléri, majd átlépi valamely megfigyelő, a  $\Sigma$  felületen rögzített kezdőadatok ismeretében a fejlődési egyenletekre alapozva nem tudjuk megmondani, mit tapasztal az adott megfigyelő a horizont mögött. A téridő folytatása általában egyértelműnek tűnik a szokásos téridő-ábrá-

<sup>5</sup> A Cauchy-horizont – bármely más, ezen cikkben előforduló horizonthoz hasonlóan – mindig egy fényszerű hiperfelület, amelyet fényszerű geodetikusok (a generátorai) feszítenek ki. Így egy horizont kauzális értelemben osztja ketté a téridőt. Mindig vannak olyan megfigyelők, amelyek egész, időben végtelen kiterjedésűnek gondolnák története a kérdéses fényszerű hiperfelület „alatt” zajlik. Ezek a megfigyelők még elvileg sem szerezhetnek tudomást a horizont fölötti téridő-tartományban lejátszódó eseményekről.

<sup>6</sup> Ez az ábra, ugyanúgy, mint a későbbiekben bemutatásra kerülő többi Carter–Penrose-féle téridő-diagram is, lényegesen leegyszerűsített. Így például a 3. ábrán – a gömbszimmetriát kihasználva – minden pont egy  $r$  sugarú 2-dimenziós gömböt helyettesít. Ugyanakkor egy (konform) transzformáció felhasználása révén még a „végtelen”, vagy pontosabban fogalmazva a különféle téridő-irányokhoz tartozó „végteleneket” is a végesben ábrázoltuk.



3. ábra. Elektromosan töltött gömbszimmetrikus csillag gravitációs összeomlását leíró téridő Carter–Penrose-diagramja. Az eseményhorizont azokat az eseményeket takarja el az összeomló csillagtól távol eső megfigyelőktől – ezek világvonalai mind a jövő időszerű végtelenen végződnek –, amelyeket ők elvileg sem figyelhetnek meg. Tetszőleges, a Cauchy-horizont alatt fekvő esemény (pl. a  $q$  esemény) kauzális múltja mindig egy korlátos zárt halmazban metszi a  $\Sigma$  kezdőfelületet.

kon. Azonban ez csak az analitikusság feltételezése révén válik ennyire egyértelművé. Korántsem ilyen magától értetődő a folytatás például már a *sima*,  $C^\infty$  geometriák körében sem.<sup>7</sup> Mivel a horizonton a geometria teljesen reguláris, jelen esetben nem bújhatunk ki a válaszadás kötelessége alól például a kvantumgravitáció szükségességére vagy a kontinuumközelítés nem adekvát voltára való hivatkozással.

### Probléma:

Ha az Einstein-elmélet még ilyen, egyáltalán nem extrém gravitációs rendszerek, illetve szituációk esetén sem képes megfelelő választ adni a felvetett problémákra, akkor szembe kell nézni azzal a lehetőséggel, hogy nem is alkalmas a természet ráesőnek vélt vetülete következetes leírására.

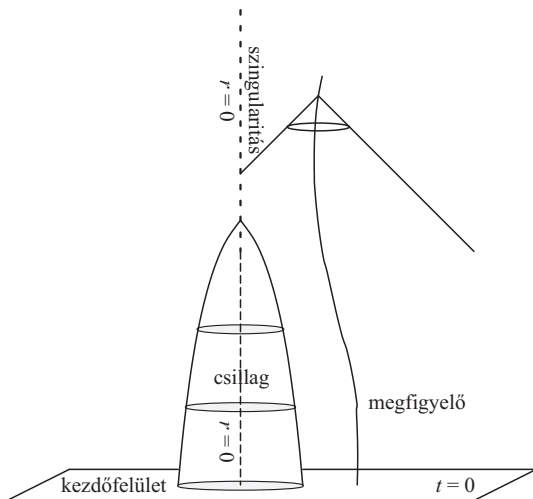
### Feloldás:

Létezik egy úgynevezett *kozmosz cenzor*, „aki” hivatalból megtiltja, hogy a fent említett jelenségek „általában” előfordulhassanak.

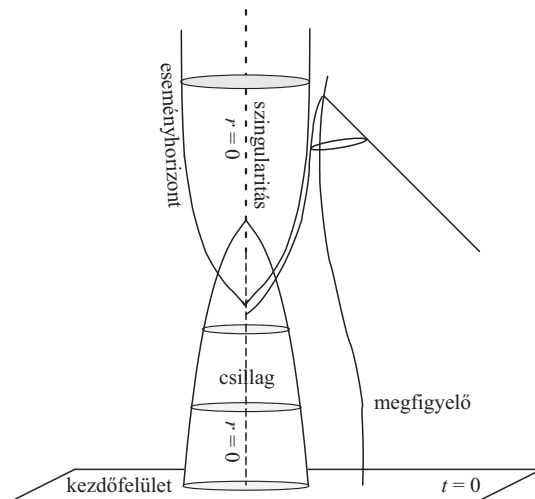
Itt mindjárt szeretném azt hangsúlyozni, hogy e hipotézis nem tekintendő az Einstein-elmélet egy újabb alapfeltevésének. Várakozásaink szerint a cenzor létezése magából az elméletből kell hogy kiolvasható legyen. Az, hogy az iménti „általában” kifejezés mi mindent takar, remélhetőleg kiderül majd a dolgozat következő részéből.

Mielőtt tovább mennénk, a teljesebb megértés elősegítése érdekében tartozom némi pontosítással. Korábban említettem, hogy az Einstein-elméletben megfogalmazott Cauchy-probléma egy folytonos és kauzális megfelelte-

<sup>7</sup> A *sima* függvények terét, amely pontosan azokból a függvényekből áll, amelyeknek tetszőleges rendű deriváltjai léteznek, a továbbiakban mi is a matematikában szokásos  $C^\infty$  szimbólummal jelöljük.



4. ábra. Csillag gravitációs összeomlása (naiv kép).



5. ábra. Csillag gravitációs összeomlása (valóságos ábrázolás).

tést biztosít a kezdőadatok, és a megoldások tere között. Ezenfelül az is bizonyítást nyert [10], hogy egy adott kezdőadat-rendszerhez mindig található (a diffeomorfizmus invarianciától eltekintve) egyértelmű, *maximális* Cauchy-fejlődés. Az azonban egyáltalán nem derül ki a vonatkozó matematikai eredményekből, hogy a kezdőfelülettől milyen messze terjed ki a nevezett maximális megoldás. Így az is előfordulhat, hogy egy maximális megoldás a kezdőfelületnek csak egy kis kiterjedésű környezetére korlátozódik. Ennek egyenes következménye az, hogy a téridő-szingularitások kialakulásának Cauchy-poblémán keresztül történő végigkövethetősége, vagy annak eldöntése, hogy egy-egy megoldás létezhet-e a benne (nem túlságosan extrém módon) mozgó megfigyelők sajátidejének tetszőlegesen nagy értékére, kívül esik a jelenleg alkalmazott matematikai apparátus hatókörén. Lényegében ez magyarázza azt, hogy az alábbiakban ismertetésre kerülő hipotézisek még mindig csak a nem teljes mértékben alátámasztott ésszerű elvárásaink közé sorolhatók.

## A „ kozmikus cenzor ”-hipotézisek

A kozmikus cenzor létezésének lehetőségét először *Penrose* vetette fel 1969-ben [6]. Az akkor megfogalmazott forma az abban az időszakban legégetőbb problémára próbált megnyugtató válasszal szolgálni, azaz a gravitációs összeomlási folyamatokban megjelenő téridő-szingularitásoknak az elmélet prediktív jellegét korlátozó esetleges következményeire irányult.

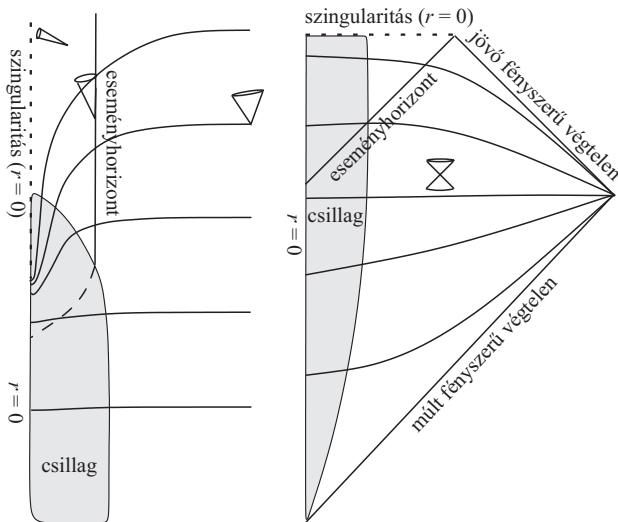
### A „gyenge kozmikus cenzor” hipotézise

Az alapprobléma jobb megértése érdekében példaként vizsgáljuk meg egy gravitációs összeomláson átmenő csillag modelljét! Az összeomlási folyamat naiv leírását a 4. *téridő-ábrán* követhetjük nyomon. Miután a csillag teljesen összezsugorodott, a centrumban szingularitás marad vissza, hiszen valahová oda préselődik be „zérus térfogatba” a korábban csillagot alkotó összes anyag. Kérdés: Milyen befolyással van a szingularitás egy olyan megfigyelőre, amely elegendően távol van ahhoz, hogy

ne zuhanjon bele a szingularitásba, de ugyanakkor láthatja azt? Szeretném felhívni a figyelmet arra, mennyire szabadelvű – már-már pikáns hangvételű – a Penrose által bevezetett tudományos terminológia (lásd pl. a [11] munkát!). Egy olyan szingularitást, amelyet a fenti értelemben egy megfigyelő megpillanthat, az adott megfigyelő szempontjából *csupasz*nak (*mezítelennek*) nevezünk. Érthetően a „megpillantás eseménye” már nem írható le a  $t = 0$  kezdőfelületen megadott adatok birtokában, hiszen a szingularitás, például az „általa kibocsátott” sugárzás révén, hatással lehet mind a geometria, mind pedig a fizikai terek ottani viselkedésére. Amennyiben a szingularitás által befolyásolt tartomány túl nagy lenne, az elmélet elvesztené azt a képességét, hogy a kezdőfelület egy kicsiny környezetétől eltekintve képes legyen megjósolni a fizikai történéseket. Ebben az esetben nem túl sokra mennénk az elmélet prediktív képességével. A „gyenge kozmikus cenzor” hipotézise azt az elvárásunkat fogalmazza meg, hogy például a fenti gravitációs összeomlást leíró téridő elegendően nagy részében megmarad az elmélet prediktív képessége. Nevezetesen, elvárjuk, hogy ezen tartomány foglalja magába az egész aszimptotikusan sík tartományt annak kauzális múltjával együtt. Ez az eseményhorizonttal (ez a Schwarzschild-téridő esetében az  $r = 2M$  egyenlet által meghatározott fényszerű felület) határolt külső téridő-tartományt jelenti. Az összeomlási folyamatot helyesen megjelenítő téridő-ábrát – a vonatkozó, egyáltalán nem triviális kauzális szerkezettel és az eseményhorizonttal – láthatjuk az 5. *ábrán*.

Így a fenti hipotézis értelmében azt is mondhatjuk, hogy a kozmikus cenzor az eseményhorizont segítségével fedi el a szingularitást az elegendően távoli megfigyelők szeme elől. Mintegy felöltözteti a szingularitásokat, ezzel szüntette meg azok „meztelenségét”. Lényegében ennek a hipotetikus tevékenységnek a megszemélyesítése során keletkezett maga a kozmikus cenzor elnevezés is.

A „gyenge kozmikus cenzor” létezését mind a mai napig nem sikerült bizonyítani. Valójában ismereteink állandó bővülése folytán az elv megfogalmazása is folyamatos finomításokon ment keresztül. Mindezek ellenére Penrose még 1979-ben az alábbi, sokkal erősebb posztulátummal állt elő [11].



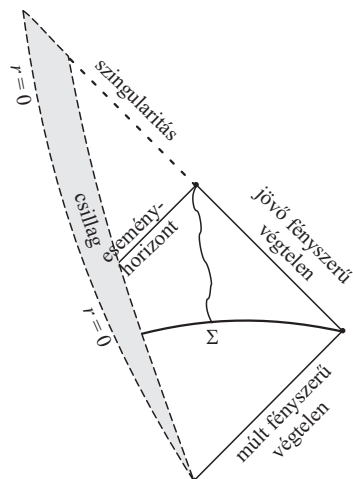
6. ábra. Cauchy-felületekkel, azaz egy globális időfüggvény szintfelületeivel, való fölíázhatóság a gravitációs összeomlás leíró gömbszimmetrikus téridőben. A Cauchy-felületek és a fénykúpok a bal oldali ábrán Schwarzschild-féle elrendezésben, míg a jobb oldalon egy konform transzformáció végrehajtásával kapott Carter–Penrose-ábrán vannak feltüntetve.

## Az „erős kozmikus cenzor” létezésére vonatkozó hipotézis

„A fizikailag reális, *megfelelően általános* téridők mind globálisan hiperbolikusak, azaz teljes egészében valamely kezdőfelületen meghatározott reguláris kezdőadatok Cauchy-fejlődéseként állnak elő.”

Ez az elv azt sugallja, hogy az előbbi gravitációs összeomlási folyamatot leíró téridőben sem csak az eseményhorizonton kívüli tartomány, hanem az egész téridő megjósolható, azaz a téregyenletek által meghatározott evolúció eredményeként áll elő. Ennek alátámasztása érdekében idézzük fel azt a jól ismert tényt, hogy a globálisan hiperbolikus téridők Cauchy-felületekkel fölíázhatók [12], azaz a Cauchy-felületekre úgy is gondolhatunk, mint az adott globálisan hiperbolikus téridőben mindenütt értelmezett (globális) időfüggvény szintfelületeire. Első ráné-

7. ábra. Perturbált, elektromosan töltött csillag gravitációs összeomlása. A téridő nem folytatható a szingularitáson túlra, hiszen ott a geometria és a fizikai mezők is egyaránt szingulárisok válnak.



zésre meglepő, de az előző gravitációs összeomlási problémához tartozóan megadható egy ilyen, az egész téridőre kiterjedő fölíáció, melyet a 6. ábra mutat. Az erős kozmikus cenzor hipotézisének értelmében az elmélet prediktív jellege csak bizonyos, nem eléggé általános téridők esetén veszt el. Azt várjuk, hogy amennyiben az elv megtestesítőjeként számon tartott kozmikus cenzor valóban létezik, akkor az összes téridők terében a kritikus, vagyis nem globálisan hiperbolikus téridők egy nullmértékű részhalmazt alkotnak.

Az erős kozmikus cenzor létezésére vonatkozó feltevésünk helytállóságát erősíti például az az eredmény is, hogy a korábban említett, elektromosan töltött csillag gravitációs összeomlása esetében bármilyen perturbatív kicsiny skalár, elektromágneses vagy gravitációs tér hozzáadása<sup>8</sup> a Cauchy-horizontnak egy fényszerű szingularitássá válását idézi elő. Így a téridőnek nem lehet folytatása a horizont mögé, hiszen maga a horizont sem létezik, amint azt a 7. ábra igyekszik szemléltetni.

Minden esetben elmondható, hogy a kritikus, nem teljes egészében globálisan hiperbolikus téridők speciálisak abban az értelemben, hogy valamilyen szimmetriával, vagy egyéb, nem általános tulajdonsággal rendelkeznek. A dolgok pikantériájához tartozik, hogy az alapegyenletek megoldása – azok bonyolultsága miatt – csak valamely vagy esetleg többféle specializáció feltételezése után válik elérhetővé. Így az ismert egzakt megoldásaink lényegében az elmélet kritikus megoldásaival esnek egybe.

Természetesen az erős kozmikus cenzor hipotézisének bizonyítása is várat még magára. Ellenben valóságos ipar fejlődött ki a kritikus pontok, különös tekintettel a csupasz szingularitásokat tartalmazó kritikus megoldások felderítésére. Minden egyes ilyen új téridő létezése a cenzor halálának biztos jeleként kerül beharangozásra. Történik ez annak ellenére, hogy a korábban említett okoknál fogva mindig csak speciális megoldások előállítására van mód, amelyek még elvileg sem lehetnek valódi ellenpéldák az erős kozmikus cenzor hipotézisével szemben. Meg kell azonban jegyezni, hogy megfelelő bizonyítási eljárás hiányában a kozmikuscenzor-hipotézis helytállóságának elfogadása vagy annak végleges elvetése továbbra is az általános relativitáselmélet egyik legfontosabb nyitott problémájának számít.

A bizonyításra irányuló törekvések között egy direkt és egy indirekt megközelítés kialakulása figyelhető meg. A direkt megközelítés bizonyos speciális, általában kozmológiai modelleként szolgáló téridő-osztályok esetén igyekszik megmutatni, hogy a maximális kezdőadat-meghatározásokhoz tartozó maximális Cauchy-fejlődés vagy egy elkerülhetetlen végső görbületi szingularitás kialakulásához vezet, vagy pedig mindenütt reguláris és teljes a téridőben mozgó – nem extrém módon gyorsuló – megfigyelők sajátidejére nézve. Ilyen irányú vizsgálatok találhatóak például a [14–19] munkákban.

A másik megközelítés azzal az indirekt feltételezéssel indul, hogy egy adott téridő-osztály elemei Cauchy-horizontot tartalmaznak. Ezek után a téregyenletek felhasználása révén annak demonstrálása a cél, hogy a Cauchy-ho-

<sup>8</sup> E kérdéskör részletes vizsgálata megtalálható például a [13] munkában.



rizont létezése miatt az adott téridők szükségképpen valamely nem általános tulajdonsággal rendelkeznek. A technikai részletek iránt érdeklődő olvasó egy ilyen típusú gondolatmenet részleteit ismerheti meg a [20–25] munkákban.

## Irodalom

1. Y. CHOQUET-BRUHAT: *Cauchy problem* – in *Gravitation: An introduction to current research* (szerk. L. Witten) New York, 1962
2. I. RÁCZ: *On the existence of Killing vector fields* – *Class. Quant. Grav.* 16 (1999) 1695–1703
3. I. RÁCZ: *Symmetries of spacetime and their relation to initial value problems* – *Class. Quant. Grav.* 18 (2001) 5103–5113
4. R. PENROSE: *Gravitational collapse and spacetime singularities* – *Phys. Rev. Lett.* 10 (1965) 66–68
5. S.W. HAWKING: *The occurrence of singularities in cosmology. III. causality and singularities* – *Proc. R. Soc. Lond. A* 300 (1967) 182–201
6. R. PENROSE: *Gravitational collapse: The role of general relativity* – *Rev. del. Nuovo Cimento* 1 (1969) 252–276
7. S.W. HAWKING, R. PENROSE: *The singularities of gravitational collapse and cosmology* – *Proc. R. Soc. Lond. A* 314 (1970) 529–548
8. R. PENROSE: *The techniques of differential topology in relativity* – Philadelphia: Siam, 1972
9. S.W. HAWKING, G.F.R. ELLIS: *The large scale structure of space-time* – Cambridge University Press, 1973
10. Y. CHOQUET-BRUHAT, R.P. GEROCH: *Global aspects of the Cauchy problem in general relativity* – *Commun. Math. Phys.* 14 (1969) 329–335
11. R. PENROSE: *Singularities an time asymmetry* – in *General relativity; An Einstein centenary survey* (szerk. S.W. Hawking, W. Israel) Cambridge University Press, 1979
12. R. GEROCH: *Domain of dependence* – *J. Math. Phys.* 11 (1970) 437–449
13. L.M. BURKO, A. ORI: *Internal structure of black holes and spacetime singularities* – *Inst. of Phys. Publ., Bristol*, 1997
14. B. BERGER, P.T. CHRUSCIEL, V. MONCRIEF: *On asymptotically flat space-times with invariant Cauchy surfaces* – *Annals of Phys.* 237 (1995) 322–354
15. P.T. CHRUSCIEL: *On uniqueness in the large of solutions of Einstein's equations* – *Proceedings of the CMA, Australia National University* 27 (1991)
16. P.T. CHRUSCIEL, A.D. RENDALL: *Strong cosmic censorship in vacuum space-times with compact, locally homogeneous Cauchy surfaces* – *Ann. Phys.* 242 (1995) 349–385
17. A.D. RENDALL: *Fuchsian analysis of singularities in Gowdy space-times beyond analyticity* – *Class. Quant. Grav.* 17 (2000) 3305–3316
18. H. RINGSTRÖM: *Curvature blow up in Bianchi VIII and IX vacuum spacetimes* – *Class. Quant. Grav.* 17 (2000) 713–731
19. H. RINGSTRÖM: *The Bianchi IX attractor* – *Annales Henri Poincaré* 2 (2001) 405–500
20. V. MONCRIEF: *Infinite-dimensional family of vacuum cosmological models with Taub-NUT (Newman-Unti-Tamburino)-type extensions* – *Phys. Rev. D.* 23 (1981) 312–315
21. V. MONCRIEF: *Neighbourhoods of Cauchy horizons in cosmological spacetimes with one Killing field* – *Ann. of Phys.* 141 (1982) 83–103
22. V. MONCRIEF, J. ISENBERG: *Symmetries of cosmological Cauchy horizons* – *Commun. Math. Phys.* 98 (1983) 387–413
23. J. ISENBERG, V. MONCRIEF: *Symmetries of cosmological Cauchy horizons with exceptional orbits* – *J. Math. Phys.* 26 (1985) 1024–1027
24. H. FRIEDRICH, I. RÁCZ, R.M. WALD: *On rigidity of spacetimes with stationary event- or compact Cauchy horizons* – *Commun. Math. Phys.* 204 (1999) 691–707
25. I. RÁCZ: *On further generalization of the rigidity theorem for spacetimes with a stationary event horizon or a compact Cauchy horizon* – *Class. Quant. Grav.* 17 (2000) 153–178

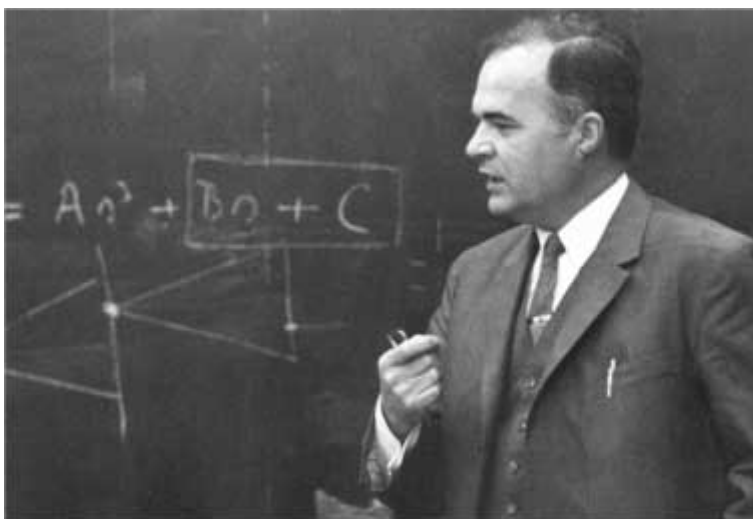
## MEGEMLÉKEZÉSEK

# PÁL LÉNÁRD 80 ÉVES

A mindig tetterre kész, a célratörő, intézmények és a tudományos élet szervezője és vezetője, az élénk érdeklődésű kutató, a fiatalság minden pozitív tulajdonságával rendelkező Pál Lénárd ez év novemberében tölti be 80. évét. Hihetetlennek tűnik ez még annak számára is, aki őt csak távolabbról ismerte, de aki közelebbről, annak szinte elképzelhetetlen.

Pál Lénárd ahhoz a fizikusnemzedékhez tartozik, amelyik közvetlenül a II. Világháború után, tele lelkesedéssel és fényes távlatokkal kezdte pályáját, amikor a fizika „nagyhatalomként” jelent meg, és az egyre sötétedő politikai háttér mellett és ellenére a tudományos kutatás Magyarországon soha nem látott támogatásban részesült. Az első fizikus vándorgyűléseknek, a KFKI alapításának, az Eötös Loránd Fizikai Társulat aktivizálódásának és a *Fizikai Szemle* indulásának ideje ez.

A tehetséges, fiatal Pál Lénárd a moszkvai aspirantúra után tevékenyen vesz részt a magyar tudományos élet-



ben, 1953-tól már tudományos osztályvezető a KFKI-ban, és ahogy haladunk előre az időben, egyre nehezebb lenne felsorolni tisztségeit, megbízatásait és kiténtetéseit,

amelyeket a tudományos és a társadalmi életben kül- és belföldön betöltött, illetve kapott. Amit el lehet és el kell mondani, az az, hogy a legkülönbözőbb posztokon – említsük meg a Magyar Tudományos Akadémia főtítkári és a Központi Fizikai Kutató Intézet főigazgatói tisztét – mindenütt pozitívan szolgálta markáns egyéniségével a magyar tudomány haladásának ügyét, és egyengette a fiatal tehetségek útját.

A szervező- és építőmunka mögött nem marad el tudományos teljesítménye sem. Különösen két területen alkotott maradandót: a szilárdtestek mágneses tulajdonságainak és fázisátalakulásainak felderítésében és a valószínűség-elmélet fizikai alkalmazásai, különösen nukleáris

reaktorokban lejátszódó sztochasztikus folyamatok egzakt tárgyalása terén (Pál–Bell-egyenlet).

A *Fizikai Szemle* szerkesztősége és olvasói külön is köszöntik az ünnepeltet nemcsak az évek során folyóiratunkban megjelent kitűnő cikkei miatt, de a szerkesztésben viselt tisztségeit is megköszönve (legutóbb éveken át a *Fizikai Szemle* társfőszerkesztője volt).

Ebben a számban több cikket szerzői az ő tiszteletének szenteltek, és még a 2005/12. számba is jut ezekből (*Kádár György* és *Krén Emil* tanulmánya).

A szerkesztőség köszönetet mond e helyen is *Jéki Lászlónak* e szám összeállításában nyújtott segítségéért.

Berényi Dénes

## PÁL LÉNÁRD KÖSZÖNTÉSE HÁROM PÁLYATÁRSTÓL

Lovas István:

Amikor megtudtam, hogy a KFKI-ban atomreaktort fognak építeni, nagy igyekezettel kezdtem tanulni a neutronfizikát, majd később kértem áthelyezésemet az ATOMKI-ból a Kísérleti Atomreaktorhoz (KAR). A felvételi vizsgán *Pál Lénárd*, a KAR vezetője néhány bemelegítő kérdést tett fel a neutronfizika tárgyköréből, majd következett egy valódi kérdés.

„*Hogyan mérné meg a neutron élettartamát?*”

Erre a kérdésre a kész válasz nem volt elraktározva a fejemben. Nem volt más lehetőség, mint kitalálni a választ. Elkezdtem hát annak felsorolását, hogy egy ilyen méréshez milyen előkészületekre van szükség. Először is kell egy neutronforrás, mondjuk, egy reaktor. Meg kell mérni a forrásból kilépő neutronok sebességeloszlását, valamint az abszolút neutronfluxust, azaz a felületegységen, időegység alatt áthaladó neutronok számát. Ezután kijelölünk egy jól definiált térfogatot, és azon engedjük át a neutronokat. Azok a neutronok, amelyek a térfogaton belül bomlanak el, már nem képesek neutronként távozni. A bomlás eredményeként proton lesz belőlük. Meg kell tehát mérni a keletkező protonok számát. (Amit eddig mondtam, az csupa trivialitás volt. De hogyan tovább?) Elképzelhető, hogy egyszerűbb, ha nem a protonokat próbáljuk megfigyelni – mondtam –, hanem a belőlük képződő hidrogént. (Ettől kezdve minden ment, mint a karikacsapás!) Az előbb emlegetett térfogatot jelöljük ki egy üvegedény segítségével, amelyet nemesgázzal töltünk meg és elektródákkal szerelünk fel! Az elektródákra megfelelő feszültséget kapcsolva gázkisülést hozunk létre. A gázkisülés színeképeiben először csak a töltőgáz színeképvonalai jelennek meg. Idővel azonban megjelennek a hidrogén vonalai is. Ezen vonalak intenzitását megmérjük az idő függvényében. Ebből következtethetünk az időegység alatt keletkező protonok számára, azaz a neutronok átlagos élettartamára.

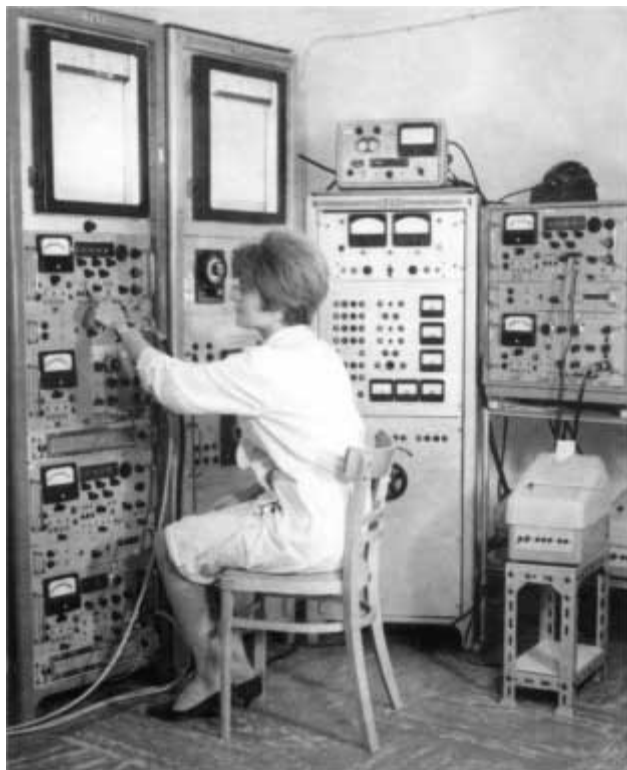
Láttam a kérdező arcán, hogy elégedett a válasszal, és a válaszadás módjából az is kitűnt, hogy az egészet most

improvizáltam. Azóta sem tudom, hogy ezt a mérést valaha is elvégezték-e úgy, ahogyan azt én szorongattatásomban kitaláltam, de számomra akkor, 1956 nyarán az volt a fontos, hogy a KAR kutatója lehetek, és Budapestre visszakerülvén eljuthatok a Petőfi Kör összejöveteleire.

Történelmi idők kezdődtek akkor!

1957 márciusában, éppen az elmúlt év tanulságairól elmélkedtem a bácsalmási Járási Börtönben, amikor nyílt a cellaajtó és átkísértek a tárgyalóterembe. A vád „tiltott határátlépés kísérlete” volt. Négy pufajkás akadályozta meg a kísérlet sikerét. Akkor még nem, de azután, több évtized óta áldom az emléküket, hogy megakadályoztak abban, hogy elhagyjam a szülőhazámat. A tárgyalás számomra rejtélyes, sőt felfoghatatlan volt. A hivatalból kirendelt ügyvédet háttérbe szorítva, a vádat képviselő ügyész olyan védőbeszédet adott elő, hogy a bíróság nyomban szabadlábra helyezett, és csak a már letöltött hat hétre ítélte. Később megtudtam, hogy Pál Lénárd volt az, aki elment a főügyészhez, és meggyőzte arról, hogy hasznosabban tudom eltölteni az időt a KFKI-ban, mint egy cellában.

Így lehetőségem támadt arra, hogy bepótoljam az utolsó néhány, Puskin utcai szeminárium anyagát, amely a paritásmegmaradás törvényének sérüléséről és következményeiről szólt. Hogy ez a törvény sérül, azt *Marx György* egy Varsóból kezdeményezett telefonhívásból tudta meg. Mint-hogy akkoriban hosszú hónapokig nem érkeztek külföldi folyóiratok a könyvtárakba, a Puskin utcai szemináriumok célja az volt, hogy fedezzük fel mindazt, amit máshol már felfedeztek. Irigységgel vegyes öröm töltött el bennünket, amikor hónapokkal később olvashattuk a *Phys. Rev.*-ben azokat az eredményeket, amelyeket már ugyancsak hónapokkal korábban, az elszigeteltségben sikerült elérnünk. A paritásmegmaradás törvényének sérülése abban nyilvánul meg a legszembeötlőbben, hogy a béta-bomlásból származó leptonok longitudinálisan polarizáltak. Ha ez így igaz – mondtam én –, akkor a polarizált pozitron szétsugárzása érzékeny a szétsugárzásban részt vevő elektron polarizációjára, amely viszont mágnesezhető anyagban módszerezen változtatható. A fentebb emlegetett *Phys. Rev.*-cikkek



Aktivációs analitikai labor (1966)

egyike éppen erről számolt be, pontosabban arról, hogy a kísérlet nem volt bizonyító erejű.

Amikor a reaktor üzembe helyezésének időpontja elközelgett, egyre többször jutott eszembe, hogy meg kellene ismételni ezt a kísérletet, pontosabban, ennek egy javított változatát. A kísérlethez leginkább egy intenzív pozitronforrás hiányzott. Pál Lénárdhoz fordultam segítségért. Elmondtam neki, hogy a reaktor beindulása utáni időkre tervezett magreakció-vizsgálatokhoz szükségünk lesz egy jó időfelbontással rendelkező koincidenziaberendezésre. Ennek a megépítéséhez és ellenőrzéséhez a legalkalmasabb módszer a pozitronszétsugárzás mérése. A pozitron-elektron szétsugárzás során ugyanis két olyan 0,51 MeV-es gamma-kvantum keletkezik egyidejűleg, amelyek egymáshoz képest 180 fokos szög alatt repülnek ki. Ezek két gamma-detektorból koincidáló jelpárt váltanak ki. Miután a reaktorral eltervezett kísérletekért felelős vezetőt meggyőztem arról, hogy pozitronforrásra szükség van, megemlítettem – mint fizikus a fizikusnak –, hogyha lenne egy jó pozitronforrás, akkor el lehetne végezni azt a kísérletet is, ami bizonyítaná, hogy a paritásmegmaradást sértő gyenge kölcsönhatás során keletkező pozitron longitudinálisan polarizált. A kísérletet mágnesszegethető anyag elektronjaival lehetne elvégezni. Minthogy Pál Lénárdnak a szakterülete a mágnességtan volt, nyomban ráhangolódott a problémára, és ott helyben megtanított a ferro-, a ferri- és az antiferromágneses anyagok legfőbb jellemzőire, valamint megígérte, hogy szerezni fog valahonnan pozitronforrást.

Szerzett. Ezzel sikerült a koincidenzia-rendszert megépíteni. A polarizációs kísérlethez már az időközben beindult reaktorral aktiváltattam jól definiált geometriájú, rövid felezési idejű, nagy intenzitású pozitronforrást. A kísérlet eredményét a *Nuclear Physics*-ben és a *Magyar*

*Fizikai Folyóirat*-ban közöltem. Egy különlenyomatot bekötöttem kemény fedélbe, és mint egyetemi disszertációt benyújtottam az ELTE-re. Kandidátusi disszertációt nem írhattam, mert rovott múltam miatt nem kaphattam kandidátusi fokozatot. De amint kitűnt, egyetemi doktori fokozatot kapni sem volt könnyű akkoriban. A dolgozatom egy évig várákozott a sorsára. A sorsa pedig nem volt túlzottan biztató, mert a *Polarizált pozitronok megsemmisülése mágneses anyagokban* cím filozófiai haragot váltott ki. „A pozitron anyag. Az anyag pedig nem semmisülhet meg!” Hogy pontosan mi történt, nem tudom. Annyit tudok csak, hogy egy év múlva a Dékáni Hivatal kitűzte a szigorlat időpontját. Az egyik vizsgáztató Pál Lénárd volt.

Kezdtél jól menni a sorom. Csakhamar amnesztiát kaptam, az Eötvös Loránd Fizikai Társulattól pedig Schmid Rezső-díjat. Meghívtak az Elméleti Fizikai Tanácsra külső előadónak. Ez azonban bonyodalmakhoz vezetett. Az Országos Atomenergia Bizottságban ugyanis az a hír járta, hogy én nyilvánosan ócsároltam a szovjet ipar és a szovjet mezőgazdaság termékeit. Csak azután fogadhattam el az egyetemi meghívást, amikor a KFKI Személyzeti Osztálya fültanúk meghallgatásával hitelt érdemlően igazolta, hogy a vád nem más, mint inszINUÁCIÓ. A következő bonyodalom akkor támadt, amikor egyéves meghívást kaptam Koppenhágába, a Bohr Intézetbe. Az OAB nem volt elég „éber”, és ezért megkaptam a kiutazáshoz szükséges útlevelet. Csak annyit tudtak „kieszközölni”, hogy a kisfiam túszként itthon maradjon.

Még hosszan folytathatnám azoknak az eseteknek a felsorolását, amelyekben a konfliktust én idéztem elő, és a konfliktus megoldása Pál Lénárdra maradt. Ehelyett egy másfajta, fontos dolgot szeretnék elmondani. A „XX. századi magyar reformkor” éveiben, 1988–89-ben, amikor egyre több hittel énekeltük, hogy „hozz reá víg esztendő”, reményeinkhez aggodalmak is társultak. Engem a KFKI sorsa izgatott. Biztos voltam benne, hogy súlyos megrázkódtatások előtt áll, és alapvető átalakítás kell ahhoz, hogy a benne felgyűlt szellemi értékek megmaradhassanak, és jó hatáskokkal működhessen tovább. A KFKI-ban eltöltött harminc év lehetőséget adott arra, hogy alaposan megismerjem a Kutatóközpont struktúráját, lehetőségeit és megoldandó gondjait, különösen azután, hogy Pál Lénárd javaslatára, az Igazgató Tanács tagja lettem.

Amikor ismételten végiggondoltam a lehetőségeket, újra és újra arra a következtetésre jutottam, hogy a KFKI szerkezetét az öt „kis intézet” determinálja. A legfontosabb feladat a „kis” jelző eltávolítása. Nagykorúsítani kell az intézeteket, egyrészt megadva mindegyiknek a szabadságot arra, hogy a maga sajátos értékrendjét kövesse, másrészt ráterhelve a működéséért viselt teljes erkölcsi és anyagi felelősséget. Az 1990-ben elindított másfél éves átalakítás lényege a „nagykorúsítás” volt. Az utóbbi másfél évtized bebizonyította, hogy a KFKI „kis” intézeteiből kifejlődött önálló intézetek sikeresen működnek és fejlődnek. Itt nyomatékkal meg kell állapítani, hogy a KFKI jelenlegi struktúráját több mint negyed századdal ezelőtt Pál Lénárd alakította ki.

„Nagyon sok barátom van, és nagyon kevés ellenségem. Ez utóbbiakat magam szoktam megválogatni.” Ez a mondat szerepelt, annak az önéletrajznak a végén, ame-

lyet 1990-ben írtam akkor, amikor megpályáztam a KFKI főigazgatói posztját. Amikor másfél év múlva a KFKI átszervezését igen sok jó barátom támogatásával és Isten segítségével befejeztem, friss önéletrajzot kellett írnom. „Az előző önéletrajzomat azzal zártam, hogy nagyon sok barátom van, és nagyon kevés ellenségem. Ez utóbbiakat, magam szoktam megválogatni. Mindez azonban régen volt!” Más szóval, az, aki vezetői pozíciót vállal, annak vállalnia kell a döntés felelősségét is, sőt a konfliktus lehetőségét is.

Pál Lénárd 80 évvel ezelőtt, az átlagosnál lényegesen jobb képességekkel született, és képességeit kemény munkával fejlesztette tovább. Ez alkalmassá tette arra, hogy élete folyamán több fontos vezetői megbízatást viseljen, ezért sok felelősséget kellett vállalnia, és sok konfliktussal kellett szembenéznie.

Amikor közeledett a szovjet rendszer vége, Pál Lénárd képes volt szembenézni a valósággal. Azt már sokkal korábban tudta, hogy változásra van szükség. Felismerte, hogy erre a lehetőség is elközlegett, ezért a változást nemcsak lehetségesnek, hanem kívánatosnak is ítélte. Tisztában volt azzal, hogy nagyon sokan készülnek a rendszerváltozásra. Volt, aki korábbi hatalmát igyekezett átmenteni, volt, aki a „vad privatizáció” korában hatalmát anyagi javakra váltotta, volt, aki az átmentett anyagi javainak egy részéért „új hatalmat” vásárolt, volt, aki a neoliberális ideológiája révén igyekezett visszaszerezni a proletárdiktatúrával együtt elveszített hatalmát.

Az elmúlt 15 év arról tanúskodott, hogy Pál Lénárd nem akart sem régi hatalmat átmenteni, sem hatalmat vagyona konvertálni, sem új hatalmat szerezni. Megelégedett azzal, hogy megőrizze azokat a szellemi értékeket, amelyeket egy életen át mint fizikus gyűjtött. A legsikeresebb munkái a valószínűség-számítás alkalmazásaihoz kapcsolódnak. A természeti jelenségek, valamint a műszaki problémák vizsgálatában elért eredményei nevét világhírűvé tették. A *Citation Index* tanúbizonysága szerint a jelenleg folytatott kutatásait is élénk érdeklődés kíséri.

Bebizonyította, hogy a hatalmat úgy is fel lehet fogni, mint a szolgálat lehetőségét. Nyolcvanadik születésnapján megköszönöm Neki, hogy ezt a szolgáltni akarást évtizedeken keresztül közelről szemlélhettem és tapasztalhattam.

Kívánom, hogy az elkövetkezendő éveket a jól végzett, eredményes munka öröme ragyogja be.

Mössbauer-laboratórium (1976)



## Króó Norbert:

1958-ban végeztem az ELTE fizikus szakán és Pál Lénárdot két minőségében ismertem: úgy, mint a KFKI – egy végzős hallgató szemében a magasságokban lebegő – igazgatóhelyettesét, valamint az ELTE-n, reaktorfizika speciális előadást tartó oktatóját. Ezt az előadást volt szerencsém hallgatni, sőt vizsgát is tettem e tárgyból.

Évfolyamtársaim zöméhez hasonlóan – a fizika ekkor erősen felszálló ágban volt – számos állásajánlatot kaptam. Nem oda kerültem, ahova szerettem volna, és ezt Pál Lénárdnak köszönhetem. Diplomamunkámat ugyanis a KFKI *Simonyi Károly* vezette Magfizikai Osztályán magrezonancia témában írtam, és ezt továbbra is szerettem volna művelni, de Pál Lénárd határozott rábeszélésre, formálódó csoportjába kerültem, ahol az 1959-ben induló kutatóreaktor mellett végezhettem szilárdtestfizikai kutatásokat. A csoport vezetője keményen dolgozott, és így természetesen tűnt, hogy a beosztottaknak is kemény, precíz munkát kellett végezni. Ez egész életre szóló leckének bizonyult. A csoport kiváló kutatókból állt, ma közülük nyolcan akadémikusok. A kiválasztás nyilván a csoport vezetőjét dicséri.

Pál Lénárd mindig fogékony volt az új dolgokra, és a körülötte dolgozókat is lelkesíteni tudta. Így köteleztem el magam a szilárd testek vizsgálatára neutronszerelési kísérletekkel, és ez az első szerelem 15 évig meg is maradt. Olyan laboratóriumot sikerült létrehozunk, amelyet akkor a világ tíz legjobbjá között tartottak számon. Nekem Pál Lénárd lehetőséget teremtett egy akkoriban fehér hollónak számító külföldi kiküldetésre: 1963–64-ben a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség ösztöndíjával több mint egy évet tölthettem egy svéd kutatóreaktornál. Segítségemre volt abban is, hogy amikor az 1968–71-ig terjedő periódusban a Dubnai Egyesített Atomkutató Intézet Neutronfizikai Laboratóriumának igazgatóhelyetteseként külföldön dolgoztam, ne szakadjon meg hazai kapcsolatrendszerem. Ezért hazatérésem után szinte zökkenőmentesen tudtam bekapcsolódni a hazai tudományos életbe.

Pál Lénárd már mint a KFKI főigazgatója beszélt rá 1971-ben egy olyan szerep vállalására, amely életem egy igen pozitív döntésének bizonyult: az intézet Optikai Főosztályának vezetésére. Az optikai és szilárdtestfizikai kultúra összekapcsolása mind egyéni, mind közösségi szinten sok izgalmas lehetőséget teremtett, és eredményekben gazdag éveket eredményezett, amit az akadémiai kutatóhálózat átvilágítása is visszaigazolt.

A rendszerváltozás után Pál Lénárd akadémikus visszavonult az aktív közéletről, de továbbra is részt vett és – egészsége korlátai között – ma is részt vesz az oktatásban és a tudományos munkában. A mód, ahogy ezt tette és teszi, példaértékű, és jellembeli nagyságát bizonyítja.

Tudományos karrieremben sokat köszönhetek Pál Lénárd akadémikusnak, aki elindított a tudomány országútján, számos dolgozatom ihletője, illetve társszerzője, akadémiai taggá választásom egyik előterjesztője. Sok évig szakmai és adminisztratív főnököm volt, akire mindig tisztelettel tekintettem, és ma is ezt teszem.

Kívánom 80. születésnapján, hogy még sokáig tevékenykedhessen a magyar és így természetesen a globális tudomány javát szolgálva.



Gyulai József:

„Rózsafa-vonóként nagy zöngésű húrhoz,  
Súrlódjék ez írás Móricz Zsigmond úrhoz...”

*Ady Endre*: Levél-féle Móricz Zsigmondhoz

Idehaza két meghatározó szakmai „főnököm” volt: *Budó Ágoston* és Pál Lénárd. Mindkettejükéről szívesen osztoom meg az emlékeimet – most Pál Lénárd az, akinek az ünnepi jókívánságainkat küldjük, küldöm.

Kevesen tudhatják, de jómagam kis híján KFKI-s lettem már a végzésemkor, 1955-ben. Egy vizsgahetet el is töltöttem egyik barátom ajánlására az intézetben, de – ezt először vallom be nyilvánosan – az intézmény akkori légköre annyira zavart, hogy bizony önként visszaléptem... A Központi Fizikai Kutató Intézet szakmai teljesítménye iránti becsülésem azonban az évekkel egyre nőtt, mígnem...

Még mindig – de csak látszólag – magamról írok. Egy frusztrált időszak oldására, 1969-ben Budó Ágoston juttatott hozzá egy USA-beli ösztöndíjhoz, ahol – akkori terveim szerint – folytatni kívántam a kandidátusi témámat az  $A_3B_3$  félvezetők kontaktjelenségeinek kutatása terén. A véletlenek játéka azonban hozzásegített, hogy bekerüljek az induló ionimplantációs kutatások egyik fellegvárába, a Caltech Elektromérnöki Karának *James W. Mayer* vezette csoportjába. Itt kikívánczik belőlem az a nagy szeretettel vallott hit, hogy Budó Ágoston még a tragikus és korai halálával is segítette a karrieremet. 1970-ben hazatérve ugyanis az új tanszékvezető által javasolt és kért témaváltás miatt feloldozást éreztem a szegedi kötöttségem alól, és elfogadhattam Pál Lénárd hívását, hogy vegyem kézbe a KFKI-ban az implantáció „félvezetős” vonatkozásait, mert ez volt az egyetlen szaktudás, amely a téma indításakor hiányzott a KFKI-ban. Nagyobb hazai megtiszteltetést nem tudtam volna elképzelni, mint hogy vezető kutatónak hívnak a KFKI-ba. Külön büszkeségem, hogy megtudtam: Lénárd megvizsgáltatta az addigi teljesítményemet, hiszen alig ismert korábban.

Kiemelkedő kollektívában találtam magam az *Erő János* vezette teamben: *Mezei Ferenc* volt az, aki Krakóban ismerte meg közelebbről az ionimplantációs technikát, és egy ideig kacérkodott is a bekapcsolódással, míg a neutronok „visszhangja” vissza vagy el nem hódította. A kollektíva másik kiemelkedő szereplője *Keszthelyi Lajos* volt, aki kanadai tapasztalatai alapján ismerte az ionsugaras analitikai vonatkozásokat, és meghonosította a Rutherford-visszaszórás technikáját a csapatával – a három „munkacsoport” egyikének vezetőjeként. Végül, és az induláskor elsősorban: a Simonyi-iskola mérnökei közül *Pásztor Endre* munkacsoportja vállalkozott az implantációs infrastruktúra honosítására, létrehozására, üzemeltetésére.

Számomra az éppen elhagyott és csodált USA-t idézte az a szervezethez, professzionalizmus, amelyet itthon a KFKI-ban megtaláltam, és amelynek részévé válhattam. Megtudtam, hogy ebben is Pál Lénárd víziója játszotta a domináns szerepet, aki bizalmat szavazott és nagyfokú önállóságot adott a munkatársainak, és akinek *Alekszandrov* akadémikussal, a Kurcsatov Intézet akkori igaz-

gatójával való jó kapcsolata eredményezte egy TPA-gépnek egy „ILU” tömegszeparátor-elvű implanterre (*Ionno-Lucsevaja Usztanovka*) való cseréjét. Az akkor megkapott gép, egy nagyáramú (10 mA foszforiont is ki lehetett csiholni az ionforrásból!) implanter ma is üzemképes, és a teljesítőképessége még ma is figyelemre méltó – a *Manfred von Ardenne* „hadifogoly” által, persze, eredetileg uránionokra tervezett ionforrásával.

A legfontosabb laborok felépültével, eszközök üzembe állásával a félvezetős alkalmazások kerültek a fókuszba, emiatt én kaptam megbízást a teljes Ionimplantációs Célprogram vezetésére.

Ezzel elkezdődtek a legszebb hazai éveim. Lénárd egyértelművé tette, hogy az USA, elsősorban az NSF tudományirányítási modelljét szeretné a KFKI-ban megvalósítani. Létrehozta a célprogramok rendszerét, amelyek határozott célra és időre verbuvált csapatokból álltak, és önálló finanszírozási jogkörrel rendelkeztek. A mi jó érzésünket több minden szolgálta: kiváló fiatalokat vehettünk fel, akik közül a legnagyobb nemzetközi szakmai karriert első fiatal kutatónk, *Csepregi László* [1] futotta be. Hasonlóan fontos és meghatározó volt az Egyesült Izzó (EIV Rt.) támogatása kiváló szakemberek és sok-sok esz- köz, anyag átadásával.

A legnagyobb hatású azonban az az 1973-ban érkezett levél lett, amelyet J.W. Mayer írt nekem: „...az NSF megkérdezett, elégedett voltam-e a »kelet-európaival«, azaz veled? Mert ha igen, az NSF kész csereprogramot finanszírozni... Belevágunk?” Pál Lénárd azonnal meglátta a kiváló lehetőséget, és teljes tekintélyével támogatta annak indítását, fenntartását. Így azután, az 1974-beli kiutazásommal, majd – első cserekutatóként – *Csepregi László* csatlakozásával megindult a program, amely – úgy hírlett – akkoriban az egyik legsikeresebb NSF-programmá nőtte ki magát. Nemcsak mi és a csoport fiataljai jutottak hozzá a nagy esélyhez, de kiemelkedő amerikai kutatók, ipari szakemberek (pl. *Charles Evans*, az „Evans and Associates” alapítója) is hónapokat töltöttek nálunk. Emellett már a hetvenes évek végéig közel ötven darab, sok ezer hivatkozást hozó, közötte „citation classic” cikket írtunk, de több – mint bezabonyosodott – ipari szempontból fontos eredményt is elértünk, amelyek közül kiemelkedik a „preamorfizációs eljárás” ötlete és kidolgozása. Ez az integrált áramkörök gyártásában a Moore-törvény teljesüléséhez nem jelentéktelen mértékben hozzájáruló, máig általánosan használatos egyik kulcseljárásaként vált ismertté. Az NSF-finanszírozás, sajnos, lezárult „Afganisztán” miatt, de a kapcsolat tovább, szinte a mai napig élt.

A célprogramnak nem csupán az indításában, de folyamatos sikerében is meghatározó szerepet játszott Pál Lénárd. Nemcsak széles látókörű menedzserként, hanem a lényeges szakmai kérdésekben is tájékozott kutatóként. Aligha volt a Lajtától keletre olyan polgári intézmény, ahol a kutatásirányítás annyira modern elvek szerint zajlott: szeptemberre a célprogram vezetője, a kollektívával együtt egy „Zöld könyv”-et készített a következő évre tervezett feladatokról és azok finansziális igényéről. Ennek diskussziójára az egyébként nagyon elfoglalt főigazgató, akadémikus, általában egy teljes félnapot fordított. Négy-

szemközt ültünk a szobájában, és részletekbe menően kérdezett, vagy inkább: faggatott. Emlékszem olyan esetre, hogy – mivel elsőként őnála jártak a folyóiratok – az egyik tervpontunkra azt mondta: „Ezt ne csináljátok, mert most olvastam, hogy már megcsinálták.” A diskusszió valahogy ilyen mondatokkal ért véget: „Rendelkezésedre áll jövőre ennyi-és-ennyi forint és ennyi-és-ennyi dollár.” Ezt követően, mivel általában a kért összegnél kissé kevesebbet ajánlott meg, volt két hetünk, hogy megmondjuk, mit törölünk a tervből. Ennek rögzítése után készült egy „Fehér könyv”, és a pénz az intézetben egy zárolt számlára került, és annak elköltéséért egyszemélyes felelősséggel tartoztam, amelyet az évi jelentés kapcsán ellenőrzött.

Volt több célprogram a KFKI-ban, valamennyi hasonlóan nagyvonalú financiálisan ellátásban részesült.

Az implantációs program nemcsak az implantáció félvezető eszközökben való alkalmazását jelentette – ebbe beleértendő a preamorfizáció világszó demonstrációs alkalmazása az EIV Rt.-nek a BF-sorozatú nagyfrekvenciás tranzistorai előállításában –, hanem egy új implanter tervezését és megépítését is. Ez a gép – az ILU ellenpontjaként – kisáramú, de rendkívül pontos adalékolást lehetővé tevő berendezés volt, amely az USA által előnyített MOS-alkalmazásokra<sup>1</sup> volt alkalmas. A berendezés Pásztor Endre csapata által való megépítésének engedélyezése is Pál Lénárd menedzseri éleslítésének volt köszönhető. Azokban az években csak néhány, kivételesen gazdag laboratóriumban (pl. Harwell, Bell) állt együttesen rendelkezésre mindkét típusú implanter.

Az implantációs Caltech-kapcsolat hozzásegítette Pál Lénárdot a buborékmemória-program víziójához, illetve annak elindításához is: Mayer professzornál tett látogatásán ismerte meg, tudtommal, *F. Humphrey* professzort, a Caltech buborékmemória-kutatásainak vezetőjét, és nyerte el ez a szellemes, mágneses elvű eszköz Lénárd érdeklődését. Ez nagyon is érthető, hiszen az ő eredeti szakmai érdeklődése, tudása biztosítékot jelentett ehhez a kutatáshoz, majdani fejlesztéshez. E látogatást követően szervezett Lénárd és *Zimmer György* a mienkhez hasonló NSF-programot *Humphrey* professzorral, amely a későbbi Buborékmemória Célprogram alapjául szolgált.

1975-ben az Implantációs célprogram Félvezető programmá alakult az LSI Integrált Áramköri Kutatási-Fejlesztési Társulás – magunk között: „LSI Kft.” – keretében, amelynek tagjai a HIKI, a TÁKI, a KFKI és a BME egyes tanszékei voltak. A társulás vállalta azt az OMF által finanszírozott feladatot, hogy 1980 végére előállít egy, az I8080-nal egyenértékű mikroprocesszort, és e képességet ezer darab elkészítésével demonstrálja. Ezt a fenti kollektíva sikeresen teljesítette – a hazai félvezető-kutatás fénykorát jelentő munkával. Hogy a mikroelektronika hazánkban nem maradhatott a rendszerváltást is túlélő kiemelt téma, ez külön tanulmány tárgya [2].

<sup>1</sup> MOS: *Metal Oxide Semiconductor*. A mai unipoláris tranzistorok szerkezeti szendvicsszerű rövid neve.

Hosszan tudnám még ecsetelni mindazt, amiért Pál Lénárdot érzem meghatározó szakmai vezetőmnek, noha szakmai értelemben csak „szomszéd” területeket műveltünk. Attól tartok azonban, hogy ez túlságosan is szubjektív, netán terjedelmesre sikerednék.

Pál Lénárd intézetvezetői és tudománypolitikai koncepcióját, mint minden tetre kész vezetőét, sokan vitatták. Vitatták az egyes célprogramok fontosságát – jómagam is vitattam, például a buborékprogramot a mindenképpen fontosabb félvezetőprogram intézeti súlyának csökkenése miatt. Az érveimet, sajnos, a történelem is igazolta. Sokan vitatták a célprogramoknak az alap kutatásokhoz viszonyított túlsúlyát – és egyes esetekben joggal tették ezt. Azt azonban, hogy ez az időszak a KFKI fénykora volt, aligha vitathatta bárki is. Arra a tényre utalok például, hogy a TPA- vagy a CAMAC-program szakmai és üzleti sikere, az MTA-nak tett befizetéseivel nemcsak hogy nagyon jelentős mértékben hozzájárult a teljes magyar kutatás finanszírozásához, de egy-egy komputernek belső pályázat útján való elnyerése révén, nemzetközi mértékkel mérve is kiemelt helyzetbe hozott sok KFKI-s kutatást, köztük kiemelkedő alap kutatásokat. Példákkal illusztrálva: a fázisátalakulások kutatását, a mágneses kutatásokat, a neutronfizikát, a lézerkutatásokat, a Mössbauer-hatás kutatását, alkalmazását, a TOKAMAK- vagy a reaktorfizikai kutatásokat – és hadd soroljam ide az ionimplantáció és ionsugaras anyagvizsgálat szakmai iskoláját is. Ennek a szakmai filozófiának volt köszönhető később az élbolyban haladás képessége a magashőmérsékletű szupravezetők kutatásában, vagy még később, a pórusos szilícium kutatásában elért sikerek esetében is. És ez alapozta meg a kilencvenes évek intézetkonszolidációi idején a létrejött fúziók szakmailag előremutató légkörét.

Ha – semmiképp sem ünneprontásul – közérdekű, de baráti önző kérdést tennék fel Pál Lénárdnak, az az lenne, hogy miért nem elégítette ki őt az a sikeres intézetvezetői szerep, amelyben nagyon kiemelkedő volt, és amelyet még sokáig folytathatott volna. Úgy érezte talán, hogy magasabb szintre törekedve, többet tehet az egész hazai tudományért?

Azt azonban mindenki elismeri, hogy tehetsége, szak tudása, széles látóköre és lelkiismeretessége biztosította, hogy a vállalt kétes értékű politikai szerep után Pál Lénárd hajtotta végre 1989 után talán a legőszintebben és legteljesebben az MTA elnökének kérését a legújabb kori szerepvállalásról. Ő tett kiemelkedő kutatói és oktatói értékeket az asztalra a legújabb időkben a következő generációk számára, mindannyiunk megbecsülését kivívva.

Kedves Lénárd! Tisztelettel köszöntelek sokak nevében, és kívánom, hogy a közöttünk töltött, értünk munkálkodó időszakod adja meg neked a jól végzett, hosszú távú sikereket eredményező munka máig ható örömét – mindezt sokáig, a lehető legjobb egészségben.

Köszönöm mindazt, amit értünk és személy szerint értem is tettél.

#### Irodalom

1. L. CSEPREGI, J. GYULAI, S.S. LAU: *The early history of solid phase epitaxial growth* – *Materials Chemistry and Physics* 46 (1996) 178–180
2. MOJZES IMRE (szerk.): *A magyar elektronikai ipar múltja és jelenje* – Műegyetemi Kiadó, 2004 – benne Gyulai József: *Előszó*

# PÁL LÉNÁRD ÉS A KÖZPONTI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZET

– a szomszéd szemével

1948-ban egy nyári estén ismertem meg *Pál Lénárdot*: előadást tartott Tihanyban, a diákszövetségi táborban. A filozófiai tárgyú előadás bőven tartalmazott a fizikai törvényszerűségekre vonatkozó utalásokat is. Ez nagy hatással volt rám, vegyésznek készülő, frissen érettségizett diákra. Főleg a fogalmak pontos meghatározása, a mondanivaló világos volta tette számomra szuggesztív erejűvé az előadást. Ezt a jellegzetességet minden tárgykörben, minden beszélgetés, Lénárd minden felszólalása, előadása alkalmával tapasztaltam.

Közelebbi – immár kétoldalú – ismeretségbe Moszkvában, Pál Lénárd aspiráns-időszakában kerültünk. Az eredeti szándéka szerinti szakra, atomfizikára, külföldiként 1950-ben nem kerülhetett. Így lett mágnességtan szakos aspiráns a Moszkvai Lomonoszov Egyetem Fizikai Karán. Nagy nyereség volt ez a szilárdtestkutatás számára, a nukleáris tudomány pedig nem vesztett, hiszen későbbi pályafutása során e tudományban is nagyot, maradandót alkotott. Ebből érzékelhető egyéniségének másik jellegzetessége: könnyen és sikeresen képes egy szakterületen szerzett ismeretet, tudást egy másik tudományágban új alkotására felhasználni. E kivételes transzformáló készség már a pálya legelejét is jellemezte: a Pázmány Péter Tudományegyetemen a vegyész szak elvégeztével fizikai tanszék tanársegédjeként kezdte tevékenységét. A kivételes transzformációs készség több egyéb tényező mellett a tudás alapos voltára és pontos emlékezőkészségre épül: több ízben adott nekem gyakorlati tanácsot egy-egy bonyolultabb szerves szintézishez, amelyet hallgatóként kellett elvégezniem. Ezek a tanácsok nemcsak a kivételes emlékezőkészségre utaltak, hanem arra is, hogy ő az ilyen gyakorlati fogásoknál is törekedett az alkalmazott eljárásban felhasznált jelenség lényegét is megérteni.

Az 50-es évek a szovjet fizika kiemelkedő éveit voltak, amit nukleáris versenyben való részvétel eredményei, a

világon első nukleáris erőmű indítása mellett a Nobel-díjasok sora (*Cserenkov, Tamm, Frank* – 1958, *Bászov, Proborov* – 1964) is mutat. A Moszkvai Egyetem Fizikai Karának hangulata, kisugárzása a tudományos problémák iránt fogékony kutatóra bizonyára nagy hatással volt. Ezt részben saját, az egyetem Kémiai Karán szerzett benyomásaim alapján is tétélezem fel. Lénárd szinte rekordidő, mintegy 30 hónap alatt készítette el és 1953 kora őszén sikerrel meg is védte a kandidátusi értekezését (elsőként az új egyetemi épület fizikai karán). Úgy éreztem, hogy ezt a munkát már teljesen önállóan végezte. Pályafutását a KFKI-ban a mágneses osztály vezetőjeként kezdte, de nyitott volt már ekkor is minden irányban: a KFKI-ban történt első találkozásunk alkalmával 1955-ben az éppen létesülő Van de Graaff generátort is megmutatta.

A kiváló transzformációs készsége járulhatott hozzá, hogy a KFKI sokirányú tevékenységét Lénárd képes volt tudományos mélységben átlátni, a különböző irányokban kutatásokat kezdeményezni, irányítani és végezni, megtalálni az eredmények gyakorlati kapcsolódási pontjait is.

Természetes volt, hogy 1955-ben, amikor a KFKI-ban napirendre került a nukleáris reaktor létesítése, a projekt irányításával Pál Lénárdot bízták meg, aki az intézet igazgatóhelyettese is lett. Nagyszerű szakemberekből álló csapatot alakított: *Szabó Ferenc, Kiss István, Gyimesi Zoltán, Sándory Mihály* és sok más kiváló szakember, újat alkotni akaró kutató eredményre törekvő szakemberekből alakult ki az irányító mag. A projekt megvalósításának gyakorlati irányítása mellett a nukleáris tudomány és a reaktortechnika elvi problémáinak kutatására is talált módot: már 1958-ban munkája jelent meg a nukleáris reaktorokban lejátszódó sztochasztikus folyamatok elméletéről. Előadást tartott az ENSZ által az *Atomenergia Békés Felhasználásáról* szervezett második genfi konferencián a neutronsokszorozódás statisztikus fluktuációjáról. E tárgykörből készítette és védte meg doktori értekezését 1959-ben és tartotta meg 1962-ben első akadémiai székfoglalóját. Egyidejűleg azonban a szilárdtesttudományhoz is hű maradt: erről tanúskodik az antiferromágneses kristályok tárgyköréből tartott székfoglalója rendes taggá választása alkalmából.

A magreakciók elméletének fejlesztése és a szilárdtestek kutatása a KFKI-ban nem maradt elméleti szinten. A magfizikai kutatások igényei nukleáris műszerek fejlesztéséhez, a nukleáris eredetű sugárzások elemzésének szükségessége a sokcsatornás analízátor létrehozásához, a feladatok megoldása az első magyar kisszámítógép, a TPA elkészítéséhez és egy egységes adatkezelő-továbbító rendszer kiépítéséhez vezettek.

A reaktorkutatások terén elért eredmények ugyancsak iniciáltak konkrét, gyakorlati célú tevékenységet is: a reaktorok fizikájára, a működésüket kísérő termohidraulikai jellemzőkre vonatkozó ismeretek adatokat szolgáltatottak a reaktorok műszerezéséhez és számítógépes irányításukhoz. Az e téren szerzett tudás hasznosult a paksi erőmű nukleáris reaktorainak üzembehelyezése, és hasz-

Sokszálas proporcionális kamra (1977)



nosul jelenleg is a felügyelet során. Nemzetközi reaktor-kutatási kollektívát alakítottak, amelynek kutatásai adatokat szolgáltatottak a 1000 MW kapacitású nukleáris reaktor-blokkok fejlesztéséhez is.

Az anyagtudomány terén is kéz a kézben járt az elmélet és a gyakorlat: jól mutatják ezt az eredmények többek között a lágymágneses anyagok és a rézalapú ötvözetek fizikája, az ionimplantációs technológiák, a mágneses buborékmemóriák, kvantumfolyadék, a fémek és ötvözetek elmélete terén.

Pál Lénárdnak – és az általa kialakított szemléletben, amely a munkatársak kiválasztásában is megnyilvánult – nagy része volt abban, hogy a KFKI kimagasló színvonalon valósította meg a természettudományos és műszaki kutatás egységét, a feladatok egységes szemléletét. Nagy szerepe volt abban, hogy a KFKI-ban kitűnő tudósok sora nőtt fel. Közülük soknak meredek volt a pályája: volt, aki 4, zömük 5–6 évvel a kandidátusi fokozat elérése után már akadémiai doktor lett.

Az alap kutatás és az alkalmazott fejlesztési célú feladatok egységes szemléletére épülő kutatásszervezés minta lett más akadémiai kutatóhelyeken, az Izotópkutató Intézetben. A Számítástechnikai Központ és az Automatizálási Kutatóintézet egyesítésénél az összevonás kezdeményezőit a KFKI sikeres tevékenysége is ösztönözte. A nagy akadémiai természettudományi intézetek meghatározó szerepet játszottak az Akadémia és az ország kutatási stratégiájának kialakításában.

Pál Lénárdot a KFKI-ban végzett tevékenysége során az ország tudományos és műszaki gondjai iránti nyitottság jellemezte. Ennek is része volt abban, hogy az Intézet folyamatosan együttműködött egy sor akadémiai és ipari kutatóintézettel, különösen a SZTAKI-val, az ATOMKI-val, az Izotópkutató Intézettel és a Távközlési Kutatóintézettel. Szoros, folyamatos kapcsolatok épültek ki a hazai ipar és a KFKI között a Gamma Művekkel, a Magyar Optikai Művekkel, a Duna menti Hőerőművel, a kohó- és gépipar vállalataival, a (Csepel, Dunaferr, Győri Vagon). Kiemelkedő szerepet játszottak a KFKI kutatói és mérnökei a Paksi Atomerőmű létesítésében. Sokan dolgoznak közülük ma is Pakson és az Országos Atomenergia Hivatalban. Pál Lénárd mindezt kezdeményezte, és támogatta az együttműködést.

Az Izotóp Intézet és a KFKI közötti együttműködés az izotópok előállításával kezdődött, kiterjedt és ma is aktív a szilárdtest- és katalizátorkutatásban. Külön is ki kell emelni az együttműködést a neutronaktivációs kémiai analízis terén. Ez a legutóbbi időben a KFKI AEKI és az IKI közötti, a hideg neutronokra épülő prompt-gamma aktivációs analízis módszerének kifejlesztésében és alkalmazásában világszerte élenjáró szerep betöltéséhez vezetett.

A KFKI apparátusa irányította az IKI nagyberuházásainak, az Izotóp Üzemnek, a központi épületnek a nagy aktivitású kobalt-sugárforrás épületének a létesítését. Talán az a tény, hogy az IKI is a telepen működött, hozzájárult ahhoz, hogy Pál Lénárd kezdeményezésére 1975-ben a KFKI négy tudományos intézetből álló intézetközponttá alakult. Ez az első lépés volt az intézetek önállóvá válásának útján, ami különböző okokból a 90-es évek elején következett be. Természetes, hogy az együttműködésben néha voltak feszültségek, volt véleményeltérés a



SAFI, saját fejlesztésű implanter (1985)

két intézet vezetői között. Az együttműködést azonban ez nem hátráltatta, az egyeztetés, a megegyezés korrekt módját mindig meg tudtuk találni, amiben nagy szerepe volt annak, hogy Lénárd képes volt ezeket a dolgokat megfelelő nagyvonalúsággal kezelni. Több, a KFKI-telepen működő intézetekben dolgozó barátunk segített – másokkal együtt – abban is, hogy az Izotópkutató 2006 januárjától ismét önállóvá válhat. Ebben – mint többen elmondták – szerepet játszottak az intézetközpontnak alárendelt intézeti működésből származó tapasztalataik is.

A KFKI nagy szerepet játszott és játszik a magyar felsőoktatásban. Professzorok sora került ki a KFKI munkatársai közül. Maga Pál Lénárd is az ELTE Atomfizika Tanszékének volt professzora. Innen került ki a Műegyetem oktatóreaktorának első generációja. A KFKI az ELTE-vel közös Fizikai Oktatási Laboratóriumot, a Műegyetemmel közös Kísérleti Fizikai Tanszékét és az Orvostudományi Egyetemmel közös Biomérnöki Kutatólaboratóriumot is alakított. KFKI-ban felnövekedett fizikusprofesszorok évtizedek óta oktatnak az ELTE, a Műegyetem, a Debreceni Egyetem és más felsőoktatási intézmények falai között.

Pál Lénárd és az általa kialakított vezető kollektíva mindig törekedett az érdemi nemzetközi tudományos együttműködésre, amelynek legelső lépéseit még *Jánossy Lajos* akadémikus, a KFKI egyik alapítója tette meg. Pál Lénárd láthatóan működésének lelegején felismerte ennek nagy fontosságát, ezt mutatják a genfi világkonferenciákon 1958-ban és 1963-ban tartott, már említett előadásai. Sokat tett az érdemi együttműködés kiépítéséért a nukleáris reaktorok fizikai jellemzőinek vizsgálatára az obnyinszki Fizikai Energetikai Intézettel és a Kurcsatov Atomenergia Intézettel. Az Orosz Tudományos Akadémia Fizikai Intézetével pedig a kvantumelektronika és a szilárdtestfizika területén alakult ki szoros együttműködés, amelyet a Nobel-díjas *Proborov* igen magásra értékelt. A 70-es években Pál Lénárd már eredményes kapcsolatokról számolt be grenoble-i Laue–Langevin, a Kaliforniai Technológiai, a jülichi Atomkutató Intézetekkel és a CERN-nel kialakított eredményes kapcsolatokról. A KFKI-ban jött létre az MTA Nemzetközi Elméleti Fizikai Műhelye is.

A mag sugárzás jelzésére és mérésére szolgáló technikat a KFKI kutatói sikeresen építették be az űrkutatásban



használt eszközrendszerbe. Ennek köszönhetően a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet kutatói eredményesen vesznek részt a nemzetközi tudományos és műszaki együttműködésének ezen a területén is. Jól emlékszem, hogy Pál Lénárd az Akadémia főtitkáráként a leghatározottabban támogatta a KFKI kutatóinak bekapcsolódását az amerikai űrkutatási programba is.

A KFKI-nak nagy szerepe volt a magyar fizika, a magyar tudomány nemzetközi elismertségében. Az erre utaló tényeket hosszan lehetne sorolni. Nagy szerepet játszott ebben Pál Lénárd nemzetközi ismertsége, elismertsége, nyitottsága és – képessége arra, hogy ennek fontosságát megértesse az Akadémián kívül is. A KFKI kutatóinak nemzetközi elismertsége már a 60-as, 70-es években kiemelkedő volt. *Marx György* mondotta 1975-ben a KFKI megalakulásának 25 éves évfordulója alkalmából: „...a magyar fizikustársadalom jelentős szerepet vívott ki a nemzetközi tudományos életben”. És: „A magyar tudomány nagykorúvá érett. Ebben a 30 éves fejlődésben kulcsszerepet játszott a Központi Fizikai Kutató Intézet.”

Ez a KFKI-től független, az adott alkalommal az MTESZ és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat nevében felszólaló tudós által adott jellemzés egyértelműen és máig érvényesen meghatározza a KFKI helyét hazánkban és a nemzetközi tudományos életben. Érvényességét és igazságát az azóta eltelt három évtized ítélete, a KFKI-ból jött tudósokat a világ nagy intézeteiben fogadó nyitott ajtók tanúsítják, vagy az EU értékelése, amely a KFKI intézeteit kiválóan minősítette. Pál Lénárd szerepe mindebben elvitathatatlan. Gondolom, nem is vitatja senki, aki mindezt ismeri.

Lénárd egy napra sem függesztette fel a tudományos munkát: most is dolgozik. Illő ebből az alkalomból idézni *Kapicát*, a világszerte ismert orosz fizikust: „Az hiszem – és élettapasztalatom is erre mutat –, hogy munkájukkal az alkotó emberek elégedettek. Tudjuk, hogy ezek az emberek általában nem különböztetik meg a munkaidejüket szabadidejüktől. Ezek az emberek tevékenységükben élnek, munkájukban látják életük lényegét.”

*Tétényi Pál*

MTA Izotópkutató Intézet

## MINDIG IZGATOTT A »MIÉRT?« KÉRDÉSE

Jéki László beszélgetése Pál Lénárd akadémikussal

– *Mikor, mivel, hogyan kezdődött a természettudomány iránti érdeklődésed?*

– Az égés foglalkoztatott először. A gyertyagyújtás, a tűzrakás mindennapjainkhoz tartozott gyerekkoromban. Első kísérletemben a gyertya égésekor fejlődő gázokat veztettem el, majd meggyújtottam. A sikeres kísérlet igazi nagy örömet, boldogságot okozott. A IV. osztály végén, 1939-ben kaptam a polgári iskolában év végi jutalmul *Faraday A gyertya természetrajza* című, az ifjúság számára írt könyvét. Remek könyv, az Athenaeum adta ki 1921-ben, érdemes lenne újra kiadni. Érdekeltek a robbanóanyagok is, már 12 éves koromban sikeresen gyártottam puskaport.

Nagyon megszerettem a kémiát, a kísérletezés örömet okozott. Kémiai ismereteimet *Grób Gyula Általános kémia* kötetéből igyekeztem bővíteni. A kísérletezés közben mindig izgatott a „miért?” kérdése, ez vezetett el ahhoz a felismeréshez, hogy matematikát és fizikát kell tanulnom a kémiai reakciók megértéséhez. A természettudományok iránti belső vonzódásomat tanárain is felismerték. Békéscsabán a felső kereskedelmi iskolában *Kircsi István*, a kereskedelmi számtantanára – akinek nem lehetek eléggé hálás – adta kezembe *Beke Manó Bevezetés a differenciál- és integrálszámításba* című könyvét. Ajánlására olvastam a *Sammlung Göschens* sorozat *Höbere Analysis* kötetét, középiskolás koromban már tanulmányozni kezdtem *Ortway Rudolf* kvantummechanika jegyzetét is.

– *1943-ban érettségiztél, tanárképzős hallgató lettél a Műegyetemen, majd 1945-től a Pázmány Péter Tudo-*

*mányegyetemen tanultál, 1949-ben kaptad meg vegyészdiplomádat. Hol kezdtél dolgozni, mi volt az első kutatási témád?*

– A Tudományegyetemen lettem tanársegéd a Gyakorlati Fizikai Intézetben. Az állapotváltozások fizikájával kezdtem foglalkozni, az olvadás és a fagyás folyamatai érdekelték.

– *Rövidesen az életedben is alapos „állapotváltozás” következett be.*

– Az 1940-es évek végén zajlott a Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) létrehozásának az előkészítése. Készültek a tudományos tervek, és munkatársakat toboroztak, engem is hívtak az új intézetbe. Az intézet 1950 szeptemberében alakult meg, de én akkor már Moszkvában voltam aspiráns. A KFKI tervezett programjában fontos helyen szerepelt részecskegyorsító berendezés építése, és engem azért küldtek Moszkvába, hogy a gyorsítók fizikáját tanulmányozzam. Ott azonban kiderült, hogy ez titkos területnek számít, külföldi nem foglalkozhat vele. Elméleti magfizikát tanulhattam volna, de felajánlották a ferromágneses kutatások lehetőségét is. Akadémiai jóváhagyással a mágnességet választottam. Ez egy újabb nagy változás volt az életemben.

Egykristályos anyagban könnyen megfigyelhető, hogy a mágnesezhetőség függ attól, hogyan áll a mágneses tér iránya a kristálytani tengelyekhez képest. Poli-kristályos anyagokban általában véletlenszerű a kristályszemcsék eloszlása. Mérési módszert dolgoztam ki, melynek révén nagy pontossággal volt meghatározható a mágneses telítettséghez közeli állapotú anyag mágne-



Van de Graaff részecskegyorsító (1971)

ses szuszceptibilitása. Kobaltmintákat vizsgáltam, és sikerült felderítenem a kobalt szaturációs szuszceptibilitásának hőmérsékletfüggésében jelentkező anomália okát. A jelenség elméleti megalapozását is megadtam. Ez volt a kandidátusi disszertációm.

– *Itthon, a KFKI-ban is folytattad ezt a témát?*

– 1953-ban jöttem haza, és azonnal megbíztak a Ferromágneses (későbbi nevén Mágneses) Osztály megszervezésével és vezetésével a KFKI-ban. Az MTA Műszaki Osztálya is támogatta a mágneses kutatások megindítását. A Moszkvában végzett kísérleteket itthon sikeresen megismételtük. Ezután a vas–alumínium rendszert kezdtük tanulmányozni. Arra voltunk kíváncsiak, hogy az atomi rendezettség hogyan befolyásolja a mágneses tulajdonságokat. Ismert volt, hogy ez az anyag kettős „Curie-ponttal” rendelkezik: melegítés hatására mágnessége csökken, majd újra nő. Alapos vizsgálatokat végeztünk, a folyamat időfüggését is meghatároztuk, és sikerült megismernünk a változások okait. Kellemes emlék életemben az az előadásom, amelyet ezekről a kérdésekről Schenectadyben, a General Electric központi laboratóriumában J. Kowal professzor meghívására tartottam.

Az ötvenes évek közepén a Távközlési Kutatóintézet-től kaptunk egy érdekes feladatot. Azt kérték, hogy mérjük meg ferritmintáink mágneses permeabilitásának frekvenciafüggését a mikrohullámú tartományban. A probléma tanulmányozása messzire, a mágneses tartományokat határoló doménfalak mozgásának leírásához, a doménfal-dinamika elméletéhez vezetett.

Munkatársaimmal együtt nagy érdeklődéssel tanulmányoztam a vas–ródiium ötvözetet, amely szobahőmérsékleten antiferromágneses, majd melegítésre ferromágnessé válik. Az atomok közötti távolságtól függő kicserélődési kölcsönhatás előjelváltásával magyarázható az átalakulás, amelynek *Ch. Kittel* által felvázolt elméletét sikerült jelentősen továbbfejlesztenem. Fiatal éveim szép emléke, hogy *L. Bates*, a mágneses kutatások akkori egyik „nagy öregje” felkért, hogy tartsak előadást vas–ródiium kutatásainkról a Nottinghamban rendezett nemzetközi mágneses konferencián.

Sokat idézik azokat az eredményeinket is, amelyeket a mangánalapú ötvözetek mágneses szerkezeteinek felderítésében értünk el. Megemlítem, hogy az antiferromágneses mangán–nikkel ötvözet tulajdonságait tanulmányozva megmutattuk, hogy rézatomok bevitelével és megfelelő hőkezeléssel egytengelyű gyenge ferromágnesség hozható létre. Az idézetekből úgy látszik, hogy a probléma mostanában ismét időszzerűvé vált a nanomágneses rétegszerkezetek kutatásában.

Nem folytatom a felsorolást, csupán megjegyzem, hogy mágneses kutatásaimban engem mindig a változások, a struktúrák közötti kapcsolatok természetének megismerése érdekelt.

– *Alig egy éve dolgoztatok még csak a mágneses vizsgálatokon, amikor újabb nagy feladatot kaptál és vállaltál. 1955-ben a kormány döntött: kísérleti atomreaktor épül a KFKI-ban. Az Országos Atomenergia Bizottság Téged bízott meg a tudományos és szervezeti kérdések összefogásával, javaslatok kidolgozásával. A reaktor 1959-re elkészült; kezdeményezésedre a KFKI-ban új tudományos irányok művelése kezdődött meg. Egyéni kutatói érdeklődésedet, témaválasztásodat hogyan befolyásolta az atomreaktor megjelenése?*

– Tudtam, hogy a semleges, ugyanakkor mágneses momentummal bíró neutronok remek lehetőséget kínálnak a mágneses anyagok vizsgálatára. Neutron-diffraktómétert építettünk, és vizsgáltuk különböző ötvözetek mágneses szerkezetét és fázisátalakulásait. Több új szerkezetet és átalakulási mechanizmust sikerült felismernünk. Azt is tudtam, hogy termikus neutronok rugalmatlan szórásának segítségével tanulmányozhatjuk a szilárdtestek elemi ger-

Rudolf Mössbauer és Mezei Ferenc (1985)



jesztéseit (a fononokat, magnonokat). Hozzákezdünk egy „korrelációs neutronspektrométer” fejlesztéséhez; a beeső neutronnyaláb pszeudovéletlen modulációjára érdekes módszert dolgoztunk ki. A kutatásokba bekapcsolódó *Mezei Ferenc* azonban felismerte, hogy a lassú neutronok energiájának mérésére sokkal célszerűbb mágneses momentumuk precesszióját felhasználni, s ezzel megalapozta a nevéhez fűződő „neutronspin-echo” módszert.

Miután kérdésed az atomreaktor megjelenésének tudományos érdeklődésemre gyakorolt hatására vonatkozott, szólnom kell a legfontosabbról. Már a reaktor üzembe helyezése előtt foglalkoztatott az a kérdés, hogy a neutronláncreakció sztochasztikus természetének milyen következményei lehetnek. Elárulhatom, hogy az az eredményem, amelyre a „legbűszkébb” vagyok, az ezzel a problémával kapcsolatos. Az általam levezetett egyenlet, később a Pál–Bell-egyenlet nevet kapta, ma is így idézik.

– *Felidézned a megszületését?*

– A reaktorban a neutronok számának változásaiban bizonyos esetekben fontos szerepet játszik a véletlen. A véletlennel műlik, melyik neutron idéz elő hasadást, hány neutron keletkezik a hasadásban, melyik fogódik be, melyik szökik meg stb. Az ingadozásokra 1946-ban *Feynman* vezetett le egy elemi megfontolásokra épülő formulát, de 1957-ben még hiányzott a neutronláncreakció tér- és energiafüggő változatának egzakt sztochasztikus elmélete. 1957 nyarán, egy balatoni kertben jöttem rá, hogy a folyamatot egy adott időpontban akkor kezelhetem egyszerűen, ha visszamegyek a kezdő pillanathoz, és megvizsgálom egy „indító” neutron sorsának lehetséges kimeneteleit. Tulajdonképpen a sztochasztikus folyamatok elméletében jól ismert, úgynevezett „hátrahaladó” egyenletet vezettem le a neutronláncreakcióra. Az egyenletet 1958-ban a *Nuovo Ciment*ben publikáltam, s ugyancsak 1958-ban előadásban ismertettem az ENSZ II. *Békés atom* konferenciáján Genfben. Hamarosan kiadták kínai fordításban; későbbi, oroszul írt cikkeimet pedig gyorsan angolra fordították Harwellben.

– *Mi volt Bell szerepe? Együtt dolgoztatok, vagy Tőled függetlenül ugyanarra az eredményre jutott?*

– Egyik sem. G.I. Bell öt évvel később, 1963-ban az egyenlet generátorfüggvényes alakjának matematikai

Jéki Lászlóval a tokamak avatásán (1979)



Szatmáry Zoltán, Hetényi István pénzügyminiszter és Szabó Ferenc a ZR-6 előtt (1986)

tulajdonságait vizsgálta, s azóta idézik az 1958-ban publikált egyenletemet Pál–Bell-egyenlet néven. Bell egyébként csak a részecskeszám ingadozását vette figyelembe, a tér- és sebességfüggést nem vizsgálta.

A részecskegyorsítóval kombinált neutronforrások, a spallációs források kutatása láthatóan új aktualitást ad az elméletnek, megszorodtak a hivatkozások.

– *Az egyenlet sikeres megalkotásával lezártad magadban ezt a témát, vagy továbbra is foglalkoztatott a probléma?*

– Sohasem „zártam le” ezt a témát. A Pál–Bell-egyenlet az elágazó folyamatok elméletének egy szép alkalmazása. Az elágazó pont folyamatokkal kedvtelésből az eltelt évtizedekben állandóan foglalkoztam. A közelmúltban általánosítottam az egyenletet véletlenül változó sokszorozó közeg esetére. Tanulmányomat tavaly ősszel a Chalmers Egyetem adta ki. Nemrégén egy magyar nyelvű jegyzetben foglaltam össze az elágazó folyamatok fizikájának elméletében elért legfontosabb eredményeimet. A jegyzetet a KFKI Atomenergia Kutatóintézet az idén adta ki. A neutronláncreakció sztochasztikus elmélete alkalmazható más területeken: a kémiában, a biológiában, sőt a társadalomtudományokban is. Felmerült az a gondolat, hogy egy kedves, régi tanítványommal, aki most igen aktív és eredményes kutató, közösen elkészítjük egy monográfia kéziratát. Talán kiadót is találunk.

– *Mi foglalkoztat még mostanában?*

– Sok minden. Bizonyára tudod, hogy nagy és bonyolult rendszerek (repülőgépek, vegyi gyárak, atomerőművek stb.) működésének biztonságát gondos vizsgálatokkal ellenőrzik. A rendszerekben lejátszódó folyamatokat számítógépen szimulálják, és megfigyelik, hogy a rendszer biztonsága szempontjából fontos paraméterek (az ún. kimenő változók) különböző feltételek mellett mekkora értékeket vesznek fel. A bemenő változók ingadozásai (bizonytalanságai) miatt a kimenő változók is ingadoznak. Ha a szimulációk során a kimenő változók egy csoportja,

vagy akár csak egyetlen kimenő változó is kilép a technológiai megfontolások alapján meghatározott elfogadási sávból, akkor nyilvánvaló, hogy további alapos vizsgálatra van szükség. Érdekelt, hogy a matematikai statisztika milyen módszereket kínál a kimenő változók analízisére. Írtam egy összefoglaló házi dolgozatot a nagyrendszerek biztonságának matematikai statisztikai ellenőrzéséről, amelyből később több publikáció született.

Sok érdekes probléma van, amelyek tanulmányozásához jól használhatók a valószínűség-elmélet módszerei. Kellemes időtöltést jelentett számomra például az autokatalitikus folyamatok sztochasztikus modelljeinek vizsgálata. Eredményeimet az *arXiv:cond-mat*-ban publikáltam.

– *Tíz éve jelent meg A valószínűségi számítás és a statisztika alapjai című kétkötetes munkád az Akadémiai Kiadónál. A könyv sikert aratott, nem csak fizikusok forgatják. Sikeresen egyezettél össze két szempontot, a matematikai igényességet és a fizikusi szemléletmódot.*

– Örülök a könyv sikerének, egyetemi előadásaim tapasztalatai alapján írtam. Az azóta eltelt évtizedben változott az álláspontom a véletlen, a valószínűség megítélésében. Ma nagyobb jelentőséget tulajdonítok a szubjektív tényezőknél, mint régebben. Egy esemény nyilván azért véletlen számunkra, mert az eseményt előidéző „kísérletben” a meghatározó okok teljes halmazának mindig csak egy részhalmaza rögzíthető. Ha azonban a részhalmazra vonatkozó tudásunk változik, változnia kell a véletlenség mértékének, az esemény valószínűségének is. Némi túlzással azt mondhatnám, hogy tudásunk állapotától „függ” az esemény valószínűsége.

Fontosnak tartom itt megjegyezni, hogy véleményem szerint a klasszikus mechanikában és az elektrodinamikában nincs véletlen, a fázistér dinamikájának szinte mindig lehetséges belső instabilitásait (a kaotikus mozgásokat) nem tekintem véletlennek. *Gibbs* és *Boltzmann* zsenialitására volt szükség, hogy megszülessen a klasszikus statisztikus mechanika, és ezzel mély értelmezést kapjon a termodinamika. A kvantummechanikában viszont a véletlen *esszenciális*, az elmélet immanens része; nélküle nem kaphatnánk a mi embereméretű világunkban is használható üzeneteket a mikrovilág történéseiről.

– *A Science folyóirat a nyáron volt 125 éves, ebből az alkalomból 125 megválaszolóra váró tudományos kérdést fogalmaztak meg. Ezek egyike azt firtatta, vajon igaza lesz-e Einsteinnek, miszerint Isten nem játszik kockajátékot. Mi a véleményed erről?*

– Nem tudok jósolni, de azt hiszem, hogy az a két szigorú „grammatikájú” nyelv (a gravitációelmélet és a kvantumelmélet), amelyeket az emberi méretektől radikálisan eltérő extrém nagy és extrém kis világok üzeneteinek megértésére ma használunk, változni fog. Nyilván szeretnénk megismerni a sötét energia titkát, megfejtetni, hogy a természeti állandók értékei miért akkorák, mint amekkorák, de az is lehet, hogy arról fogunk meggyőződni, hogy a tudásnak vannak számunkra megismerhetetlen birodalmi. Ki tudja?

– *Eddig egyéni vagy a kutatócsoportban végzett fizikusi munkádról beszélgettünk. Ez is imponálóan sokszínű. A KFKI hosszú időn át volt vezetőjeként azonban a kutatóintézet egészére nagy befolyással, hatással voltál.*



Wigner Jenővel (1983)

*Témák sora indult kezdeményezésedre. Mindannyiunknak imponált, hogy minden témáról érdemi diszkussziót lehetett Veled folytatni. Hogyan csináltad?*

– Nem volt különleges módszerem, egyszerűen minden érdekelt. Örömmel töltött el, ha valami újdonságról értesültem, és igyekeztem megérteni. Rendszeresen olvastam a legfontosabb folyóiratokat, és sokat beszélgettem a kutatókkal. Nem vezetői kötelességből, hanem szakmai érdeklődésből tettem fel kérdéseket és vitatkoztam. Szerettem, és szeretem a jó, az érdemi szakmai vitákat. Szerettem megismerni mások munkáját, én is szívesen beszéltem a magaméről. Publikációim is születtek ilyen beszélgetésekből, eredetileg tőlem távol eső témákban is. A fizikusokon kívül elsősorban a matematikusokkal folytatott beszélgetéseim voltak gyümölcsözőek. Mindig örömmel gondolok azokra a régi, szép esti sétákra, amelyeken *Rényi Alfréd* (Buba) mesélt nekem a határeloszlás-tételekről, a feltételes valószínűség új definíciójáról és sok minden egyébről.

Mások példájából is tanultam. Minden iránt érdeklődő ember volt *A.P. Alekszandrov*, a moszkvai Kurcsatov Intézet vezetője, a Szovjetunió Tudományos Akadémiájának elnöke, akivel több közös kutatási programot indítottunk el. Tiszteltem nyitottságáért, széles körű érdeklődéséért. Szerettem a mélyen gondolkodó *D.I. Blobincev*vel találkozni. Élmény volt részt venni a Nobel-díjas *P.L. Kapica* híres ebédjein. Intézetének munkatársai és külföldi vendégek ülték körül az asztalt, és fizikáról beszélgettek. Kapica távoli, egymáshoz látszólag nem kapcsolódó dolgokat tudott szellemesen összekapcsolni. Sokszor készítették gondolkodásra *Jánossy Lajos*nak az elfogadott nézetekkel általában szembenálló, meghökkentően érdekes kérdéseit. Szívesen emlékszem a francia *Louis Néelle*vel folytatott diszkussziókra is, ő az antiferromágnességgel és a ferrimágnességgel kapcsolatos kutatásaiért kapott Nobel-díjat.

Sok híres fizikus látogatta meg a KFKI-t, szólt elismeréssel tudományos eredményeiről. Jó most erre emlékezni.

– *Olvásóink nevében is további alkotó éveket kívánok Neked, legyen továbbra is sok örömed új tudományos problémák megismerésében és megoldásában. Köszönöm a beszélgetést.*



# FARKAS HENRIK

1942–2005

Farkas Henrik Egertől nem messze, a hegyek közt megbúvó Noszvajon született 1942 szeptemberében. A baptista család élete nem volt könnyű az 50-es és 60-as években, és csak Henrik kiváló tanulmányi eredményei tették lehetővé, hogy a bekerüljön a Debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetemre, ahol 1965-ben végzett kitüntetéses oklevéllel mint fizikus. Végzés után tanárai javaslatára került a Műegyetemre, *Gyarmati István* kutatócsoportjába, ahol először találkoztam vele. Az ezt követő 40 évben együtt dolgoztunk, és legközelebbi barátommá vált az idők során.

A nevezetes Gyarmati-iskola tagjaként először termodinamikai kutatásokba kezdett. Első publikációi a Gyarmati-féle variációs elvvel foglalkoztak, annak nemlineáris rendszerekre való általánosítása volt az egyik legfontosabb eredménye. Élete végéig érdeklődött a makroszkopikus rendszerek variációs elvei iránt; ezzel kapcsolatos nézeteit legutóbb egy könyvfejezetben foglalta össze [1]. Szerzőtársa a lengyel *Stanislaw Sieniutycz* professzor volt, akivel együtt a könyv szerkesztését is végezték. Henrik méltán volt büszke erre a könyvre, amelynek a megjelenése csak néhány hónappal előzte meg halálát. Több közleményt szentelt a hővezetés fenomenológikus elméletének, és kandidátusi értekezésének is ez volt a tárgya. Általánosította a hővezetés úgynevezett maximumelvét, továbbá független, új bizonyítást adott erre. Legutóbb 2000-ben egy könyvrészletben tárgyalta a hővezetés kvalitatív tulajdonságait [2].

Henrik egyik legjellemzőbb tulajdonsága volt, hogy mindenkinek örömmel segített. Így kezdtem el dolgozni vele én is, amikor az oszcillációs reakciókkal kapcsolatban ráébredtem, hogy a dinamikai rendszerek elméletében segítségemre van szükségem. Első ilyen közös munkánk az oszcillációs reakciók úgynevezett explodátormodelljének a megalkotása volt [3]. Henrik bebizonyította, hogy az explózív modellek bizonyos reakciók hozzávételével határciklusos oszcillátorokká alakíthatók. A Lotka–Volterra-rendszerből kiindulva további új explodátor típusú modelleket alkotott, melyek globális explózív jellegét igen elegánsan, Ljapunov-függvény megadásával tudta bizonyítani [4, 5].

A kémiai dinamikai rendszerek nemegyensúlyi fázisdiagramjai (az ún. bifurkációs „térképek”) szerkesztéséhez munkatársaival együtt egy új, igen hatékony módszert dolgozott ki, a parametrikus reprezentáció módsze-



rét [6, 7], amelyet ma már a világ számos helyén alkalmaznak. A geometriai módszereket nagyon szerette, és kiváló intuícióval használta a parametrikus reprezentáción túl a kémiai hullámokról írt számos fontos munkájában [8, 9]. A geometriával, a hullámokkal és a fényvel kapcsolatban a *Fizikai Szemlében* is jelentek meg cikkei [10, 11].

Farkas Henrik szívesen és önzetlenül harcolt társadalmilag fontos ügyekért. E téren elért legnagyobb sikere a sorkatonaság eltörlése volt, amelyet tevékenysége évekkel hozott előbbre [12]. Élete utolsó hónapjait munkahelye, a BME Kémiai Fizika Tanszéke megvédésének szentelte.

Optimista volt: hitt a jó ügyekben, az objektív igazságban, a tudományban. Emlékét szívünkben őrizzük.

Noszticzius Zoltán

## Irodalom

1. S. SIENIUTYCZ, H. FARKAS: *Progress in variational formulations for macroscopic processes* – Chapter 1 in *Variational and Extrinsic Principles in Macroscopic Systems* (eds. S. Sieniutycz, H. Farkas) Elsevier, 2005, 3–24
2. H. FARKAS, I. FARAGO, P.L. SIMON: *Qualitative properties of conductive heat transfer* – in *Thermodynamics of Energy Conversion and Transport* (eds. S. Sieniutycz, A. de Vos) Springer, N.Y., 2000, ISBN: 0-387-98938-2
3. Z. NOSZTICZIUS, H. FARKAS, Z.A. SCHELLY: *Explosion: a new skeleton mechanism for the balate driven chemical oscillators* – J. Chem. Phys. 80 (1984) 6062–6070
4. H. FARKAS, Z. NOSZTICZIUS: *Generalized Lotka–Volterra schemes. Construction of two-dimensional explodator cores and their Liapunov functions via “critical” Hopf bifurcations* – J. Chem. Soc. Faraday Trans. 2. 81 (1985) 1487–1505
5. H. FARKAS, Z. NOSZTICZIUS: *Explosive, conservative and dissipative systems and chemical oscillators* – in *Advances in Thermodynamics, Vol. 6. Flow, Diffusion, and Rate Processes* (eds.: S. Sieniutycz, P. Salamon) Taylor and Francis, New York, 1992, 303–339
6. P.L. SIMON, H. FARKAS, M. WITTMANN: *Constructing global bifurcation diagrams by the parametric representation method* – J. Comp. Appl. Math. 108 (1999) 157–176
7. P.L. SIMON, E. HILD, H. FARKAS: *Relationships between the discriminant curve and other bifurcation diagrams* – Journal of Mathematical Chemistry 29/4 (2001) 245–265
8. A. VOLDFORD, P.L. SIMON, H. FARKAS, Z. NOSZTICZIUS: *Rotating chemical waves: theory and experiments* – Physica A 274 (1999) 30–49
9. H. FARKAS, K. KÁLY-KULLAI, S. SIENIUTYCZ: *The Fermat Principle and Chemical Waves* – Chapter 17 in *Variational and Extrinsic Principles in Macroscopic Systems* (eds. S. Sieniutycz, H. Farkas) Elsevier, 2005, 355–374
10. FARKAS H., HILD E.: *A napfogyatkozás kétdimenziós modellje* – Fizikai Szemle 50/3 (2000) 97–98
11. ANTAL A., KÁLY-KULLAI K., FARKAS H.: *A napsugárzás spektruma és az emberi szem érzékenysége* – Fizikai Szemle 55 (2005) 199–203
12. CSAPODY T.: *Farkas Henrik 1942–2005* – Élet és Irodalom 2005. július 29., 8

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](mailto:mail.elft@mtesz.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Berényi Dénes főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 600.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257

# A FIZIKA ORSZÁGOS KÖZÉPISKOLAI TANULMÁNYI VERSENY HARMADIK FORDULÓJA A HARMADIK KATEGÓRIA RÉSZÉRE – 2005

Vannay László, Fülöp Ferenc, Máthé József, Nagy Tamás  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Fizikai Intézet, Kísérleti Fizika Tanszék

A fizika Országos Középfiskolai Tanulmányi Verseny – a korábbi évekhez hasonlóan – ebben az évben is három kategóriában került megrendezésre. Külön-külön csoportban versenyeztek a szakiskolák tanulói, az általános, valamint az emelt szintű fizikaoktatásban részesülő diákok. Mind a három csoport részére három fordulóból állt a verseny. Az első két forduló során elméleti problémákat kellett megoldaniuk a versenyzőknek, míg a harmadik fordulóban mérési feladatokkal kellett megbirkózniuk. A harmadik fordulóban az első két forduló legjobbjai mérték össze tudásukat és ügyességüket.

A BME Fizikai Intézet az emelt szintű fizikaoktatásban részesülő diákok (harmadik kategória) versenyének harmadik fordulóját rendezte. A versenynek ebben a forduló-jában tizenkilenc fiatal vett részt. Közleményünkben, erről a versenyről számolunk be. Dolgozatunkban bemutatjuk a versenyforduló kezdetekor kiadott írásos anyagot úgy, ahogy a versenyzők megkapták. Ennek az anyagnak a segítségével akartuk megismertetni a versenyzőket a megoldandó feladattal és a feladat megoldásához rendelkezésük-re álló eszközökkel. A kiadott írásos anyagok bemutatása után vázoljuk a kitűzött feladatok megoldásának módját, majd beszámolunk a verseny közben és az értékelés során szerzett tapasztalatokról és a versenyzők eredményeiről, végül köszönetet mondunk mindazoknak, akik közremű-ködtek a verseny előkészítésében vagy lebonyolításában.

## A versenyzők részére kiadott írásos anyag

Jelenleg az emberiség energiaigényét zömmel fosszilis energiahordozók (olaj, földgáz és szén) elégetésével elégítjük ki. A fosszilis energiahordozók felhasználásával kapcsolatban egyre növekvő problémát jelent a készletek véges mivolta és az elégetésükkel járó káros környezeti hatások. A levegőbe jutó égéstermékek szennyezik a levegőt (allergiát, daganatos betegségeket stb. okozva), a keletkező szén-dioxid pedig üvegházhatást hoz létre, ami a légkör melegedését eredményezi.

Az energiagazdálkodás eddigi gyakorlata huzamosabb ideig tovább nem folytatható. Az energiaigények kielégítése hosszabb távon csak környezetbarát szemlélettel képzelhető el, ami energiatakarékossággal és a megújuló energiaforrások egyre fokozottabb felhasználásával kell, hogy együtt járjon.

A megújuló energiaforrások alkalmazása a Föld természetes energiaegyensúlyát nem változtatja meg. A megújuló energiaforrások a napsugárzás közvetett vagy közvetlen hasznosítását és a talajhő felhasználását jelentik. A napenergia közvetett felhasználása a víz-, a szél-, a biomassza-energia hasznosítása, a közvetlen hasznosítás pedig a napelemek és a napkollektorok segítségével lehetséges. A jelenlegi verseny a napkollektorral való ismerkedést szolgálja.

## A feladatok

1. Határozza meg, hogy hogyan függ a reflektorral megvilágított napkollektormodellből kivethető teljesítmény a rendszerben keringő víz adott rotaméterrel mérhető áramerősségétől! Mérési eredményeit tüntesse fel grafikonon! Fűzzön magyarázatot a kapott eredményekhez! A mérés elvégzéséhez a kollektortól 30 cm-re, a kollektor közepével szembe helyezze el a Napot helyettesítő reflektort!

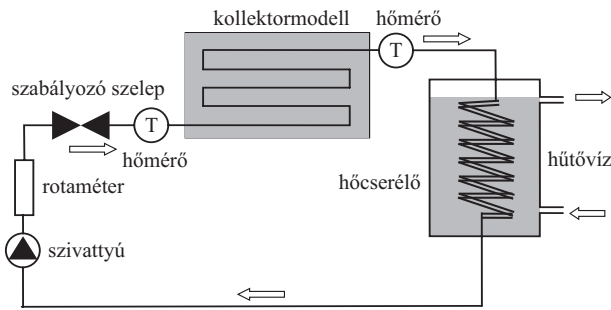
2. A rendelkezésére álló eszközökkel, mérés segítségével határozza meg, hogy a lámpa sugárzásából mekkora teljesítményt nyel el egy  $15 \times 20 \times 0,05$  cm méretű, feketére festett vörösréz lemez, ha az a lámpával szemben, attól 30 cm-re helyezkedik el!

3. Mérési eredményei alapján adjon közelítő értéket arra vonatkozóan, hogy a napkollektor milyen hatásfokkal hasznosítja az elnyelt sugárzási energiát, különböző vízáram-erősségek mellett! Sorolja fel, hogy véleménye szerint milyen tényezők hatását nem tudta figyelembe venni a hatásfok megállapításánál! Hogyan módosítják ezek a tényezők a hatásfokot?

4. Munkájáról készítsen olyan részletes jegyzőkönyvet, hogy segítségével egyértelműen megismételhető legyen az Ön által végzett mérés!

## A mérőhelyen található eszközök és anyagok

1. A kollektormodell a csatlakozó rendszerrel (részletes ismertetését lásd később)
2. Halogén reflektor (500 W) állvánnyal
3. Digitális hőmérő váltókapcsolóval
4. 2 db  $15 \times 20$  cm-es, 0,5 mm vastag rézlemez a két oldalán feketére festve, az egyik oldalára forrasztott termoelemmel (a termoelemről bővebben később)
5. Termosztát jéggel (a termoelem „nullpontjához”)



1. ábra. Kollektormodell a csatlakozó rendszerrel

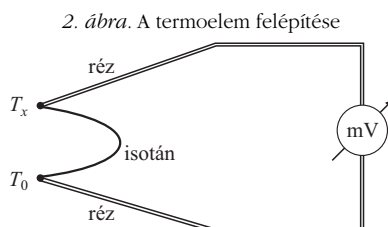
6. 3 db HAMEG gyártmányú, HM 8011-3 típusú digitális multiméter (használati utasítás a mérőhelyen)
7. ST 255 típusú egyenáramú tápegység (0–5 A-ig terhelhető, 0–25 V változtatható feszültséggel, használati utasítás a mérőhelyen)
8. Fűtőtest nyomtatott áramköri lapon, csatlakozó vezetékkel
9. 15×20 cm-es „üres” nyomtatott áramköri lemez
10. Bunsen-állvány dióval és fogóval
11. 4 db csipesz
12. Cső (20 cm hosszú)
13. Műanyag vonalzó
14. Cérna
15. Hőmérő

### A kollektormodell és a hozzá csatlakozó rendszer felépítése

A napkollektor feladata, hogy a Naptól érkező sugárzás minél nagyobb hányadát elnyelje, és az elnyelt energia segítségével melegítse a rendszerben keringő folyadékot.

A versenyen alkalmazott kollektormodell fontos eleme egy 1,5 mm vastag rézlemez, amelynek az egyik oldalára réz csőkigyót forrasztottunk, a másik oldalát matt fekete festékkel festettük be, hogy a reá érkező sugárzás minél nagyobb hányadát nyelje el. A hőveszteségek csökkentése érdekében a lemezt és a csőkigyót hátul és oldalt 20 mm-es hungarocell hőszigetelés veszi körül. A modellt és a hozzá csatlakozó rendszer vázlatát az 1. ábra mutatja.

A rendszerben lévő víz keringtetését egy akváriumszivattyú végzi. A vízáram erősségének mérésére egy rotaméter, és az áramerősség változtatására egy szabályozó szelep található a körben. A rotaméterről a vízáram erőssége  $\text{cm}^3/\text{perc}$  egységekben olvasható le. (A beállított áram értéke az „úszó” felső pereménél olvasható le.) A rotaméter hitelesítése 60 °C-os vízzel történt, ennek felel meg a rotaméteren látható skála. Az ettől eltérő hőmérsékletű vízre vonatkozó adatok az 1. és 2. táblázatból



2. ábra. A termoelem felépítése

1. táblázat

**A vízáram erőssége ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ) különböző hőmérsékleten**

Jelölés a rotaméteren	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
20	7,21	10,36	13,28	15,84	18,07	20,00
40	19,13	24,88	29,74	33,80	37,18	40,00
60	33,86	41,49	47,65	52,62	56,67	60,00
80	49,80	58,95	66,11	71,76	76,30	80,00
100	66,32	76,73	84,74	90,97	95,95	100,00
120	82,96	94,56	103,37	110,20	115,61	120,00
140	99,80	112,50	122,06	129,43	135,27	140,00
160	117,47	131,01	141,12	148,89	155,03	160,00
180	135,09	149,48	160,16	168,33	174,78	180,00
200	152,67	167,90	179,15	187,75	194,52	200,00

2. táblázat

**A víz sűrűsége ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) különböző hőmérsékleten**

10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
999,73	998,23	995,68	992,25	988,07	983,24

határozhatók meg. A rendszer zavartalan működésének feltétele a jó légtelenítés!

A kollektorba be-, illetve az onnan kilépő víz hőmérsékletét két termisztor (hőmérsékletfüggő ellenállás) méri (az ábrán T-vel jelölve). A termisztorok egy váltókapcsolón keresztül felváltva csatlakoztathatók a digitális kijelző műszerhez, amelyről 0,1 °C pontossággal olvasható le a hőmérséklet. A kollektorban felmelegedett víz a csapvízzel hűtött hőcserélőben adja le energiáját.

### A termoelem és használata

A termoelemek működése a két különböző anyagú fém érintkezésénél tapasztalható „kontaktpotenciál”-on alapul. A kontaktpotenciál az érintkező fémek anyagától és a hőmérséklettől függ. A versenyen réz–isotán termoelemet használunk, a 2. ábrán látható kapcsolásban.

A réz–isotán átmenetek közül az egyiket  $T_0$ , a másikat  $T_x$  hőmérsékleten tartva a millivoltmérő műszer a két hőmérséklet különbségével arányos feszültséget mér. Ha  $T_0$  ismert hőmérséklet (jelenleg az olvadó jég segítségével előállított 0 °C), a  $T_x$  hőmérséklet a mért feszültség ismeretében meghatározható. A termoelem hitelesítésekor megállapítottuk, hogy az elem által szolgáltatott feszültség 39,6  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Megjegyezzük, hogy esetünkben a termoelem és a vörösréz lemez közötti jó termikus kapcsolat érdekében a termoelem egyik elemét – húzal helyett – a vizsgált lemez képezi.

### Megjegyzések

1. A feladatok megoldásához 4 óra áll rendelkezésére.
2. Ha a kiadott műszerek használatával kapcsolatban problémái jelentkeznek, forduljon a felügyelő tanárokhöz.

3. táblázat

## A mért adatok és a belőlük számított teljesítmény

áramlási sebesség (cm <sup>3</sup> /perc)		vízhőmérséklet (°C)			számított teljesít- mény (W)
rotaméter szerint	korrigált értéke	belépő	kilépő	változás	
20	12,64	28,7	82,7	59,4	48,38
40	25,66	21,6	69,4	47,8	85,51
60	40,57	18,8	57,5	38,7	109,46
80	56,66	17,5	48,0	30,5	120,48
100	73,50	16,9	42,7	25,8	132,20
120	90,62	16,6	38,3	21,7	137,09
140	108,05	16,5	34,9	18,4	138,60
160	126,14	16,4	32,3	15,9	139,82
180	144,30	16,4	30,4	14,0	140,84
200	162,42	16,4	29,5	13,1	141,33

3. Ha munkája közben rendellenességet tapasztal, azonnal jelentse a felügyelő tanároknak.

4. Ha légtelenítési hibát tapasztal, szóljon a felügyelőknek.

5. Tartsa be a balesetvédelmi előírásokat! Vigyázzon saját magára és az eszközök épségére!

Különös gonddal figyeljen arra, hogy

- a rendszer esetleges meghibásodása alkalmával kifolyó víz ne kerüljön feszültség alatt lévő elemekhez!
- a kísérletek alatt felmelegedett felületek ne okozzanak sérülést! A legmelegebb a reflektor háza!
- kímélje szemét, ne nézzen a reflektor erős fényébe!

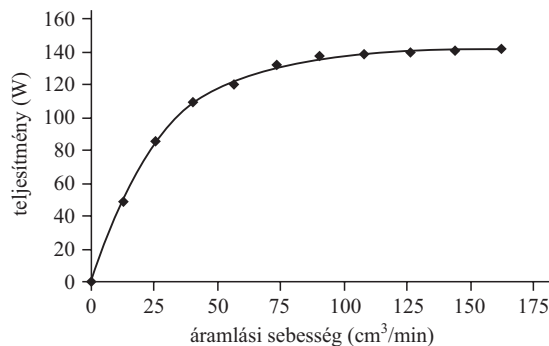
## A feladat megoldása

A kollektor közepével szemben, 30 cm-re helyeztük el, a kollektorra merőlegesen sugárzó lámpát. (Vizsgálataink szerint a lámpa tükröző felülete előtt lévő vonalzó a kollektor felületére közel egyenletesen sugárzott.) A rendszerben keringő víz áramlási sebességét a rotaméterrel mértük, és a különböző értékeket a szabályozó szeleppel állítottuk be. A rotaméter skálájáról leolvasott értékeket a kollektorba belépő víz hőmérsékletének figyelembevételével a megadott táblázat segítségével, interpolálással korrigáltuk. A kollektorba belépő és az onnan kilépő víz hőmérsékletét a digitális kijelzésű hőmérőről olvastuk le, a sebességváltoztatások alkalmával az állandósult állapot beállta után. (Az állandósult állapot 15–20 perc alatt alakult ki.) A hőcserélőben lévő víz hőmérsékletét 0,1 °C beosztású higanyos hőmérővel mértük.

A kollektorból kivehető teljesítményt a

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = c m \frac{\Delta T}{\Delta \tau}$$

összefüggésből határoztuk meg, ahol  $c$  a víz fajhője,  $m$  a  $\Delta \tau$  idő – esetünkben 60 s – alatt átáramló víz tömege és  $\Delta T$  a víz hőmérsékletének változása, a be-, illetve kilépő víz hőmérsékletének különbsége.



3. ábra. A kivehető teljesítmény az áramlási sebesség függvényében

15 °C-os hűtővíz és 25 °C-os környezeti hőmérséklet mellett a mért adatokat és a belőlük számított teljesítményeket a 3. táblázatban tüntetjük fel. A táblázatban szereplő adatok felhasználásával készült a 3. ábra grafikonja.

A grafikonról jól látszik, hogy alacsony áramlási sebességnél, ahol a kollektor erősen felmelegszik, a környezet felé leadott hőmennyiség nagy, a nagy veszteség miatt kicsi a kivehető teljesítmény. Nagyobb áramlási sebesség mellett kisebb a kollektor felülete és a környezet közötti hőmérséklet-különbség, ezért kisebb a veszteség és nagyobb a rendszerből kivehető teljesítmény, nagyobb a hatásfok.

A modellből kivehető legnagyobb teljesítmény 141 W-ra becsülhető.

Azt, hogy a lámpa sugárzásából mekkora teljesítményt nyel el a modell, a 15×20×0,05 cm méretű, két oldalán a kollektorral azonos felületi kiképzésű, feketére festett vörösréz lemez felhasználásával határoztuk meg.

A lámpával szemben, a kollektormodell helyére elhelyeztünk egy ilyen lemezt. Ez a lemez feltehetően negyedakkora teljesítményt nyel el a lámpa sugárzásából, mint a modell. A sugárzásnak kitett lemez kezdetben folyamatosan melegszik. A melegedés addig tart, míg az elnyelt teljesítmény egyenlő nem lesz a lemez két oldalán a környezetnek átadott teljesítménnyel. Ekkor éri el a lemez hőmérséklete a legnagyobb értéket. A lemezre forrasztott termoelem ekkor adja a legnagyobb feszültséget. Ezt a feszültséget mértük és megjegyeztük. (A legnagyobb feszültség ismeretében meghatározhatnánk a lemez maximális hőmérsékletét, de erre nincs szükség.)

Az előbbi lemezből két darabot véve, egy nyomtatott áramkört lapon kimarított fűtőtest és egy „üres” nyomtatott áramkört lap felhasználásával egy szimmetrikus elrendezésű szendvicsszerkezetet hoztunk létre. A szerkezetben középen helyezkedett el a fűtőtest és ennek két oldalán egy-egy „üres” nyomtatott áramkört lemez és rézlemez. A fűtőtest teljesítményét változtatva a két lemezt úgy fűtöttük fel, hogy állandósult állapotban a külső felület hőmérséklete megegyezzen a lámpával történő besugárzásakor tapasztalt legnagyobb értékkel. Ennek az állapotnak a beálltát a felületre forrasztott termoelem feszültségének mérésével határoztuk meg.

Az állandósult állapotban a fűtőtest teljesítménye a két külső felületen a környezetnek adódik át ugyanúgy, mint a lámpával történő besugárzásakor az elnyelt teljesítmény. Azt mondhatjuk, hogy az azonos körülmények között kialakult állandósult állapotokban a fűtőtest teljesítménye és a besugárzásakor elnyelt teljesítmény nagysága megegyezik.



A leírtak szerint eljárva a lemez által elnyelt teljesítményt 51 W-nak (23,5 V és 2,17 A) mértük. Mivel a vizsgálatnak ebben a részében alkalmazott lemez felülete a kollektormodell felületének a negyede volt, azt mondhatjuk, hogy az alkalmazott kollektor 204 W teljesítményt nyelt el a lámpa sugárzásából.

A kapott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a modellben áramló víz alacsony áramlási sebessége mellett a kollektor hatásfoka 68,6%. Megjegyezzük, hogy egy működő kollektor „jellemző hatásfoka” közel 60%, míg optimális esetben a hatásfok megközelíti a 80%-ot.

## A versennyel kapcsolatos megjegyzések és az eredmények

A harmadik fordulóra behívott 20 versenyző közül 10 diáknak volt az addigi teljesítménye alapján maximális 300 pontja. Az eddig szerzett legalacsonyabb pontszám is 260 volt. Az első két forduló nem tudott különbséget tenni a versenyzők között, „nem húzta szét eléggé a mezőnyt”. Így a végső sorrend kialakítása a mérési fordulón történt.

A feladat meghatározásakor úgy gondoltuk, hogy az első részt – a modelltől kivehető teljesítmény kimérését – a versenyzők zöme sikeresen megoldja. Egy teljesen beállított rendszerben a víz keringési sebességét kellett változtatni, és digitális kijelzésű műszerről két hőmérséklet leolvasásával a feladat megoldható volt. Meglepetéssel vettük észre, hogy többen már ezzel a feladattal sem tudtak megbirkózni. Örömmel tapasztaltuk viszont, hogy többen helyesen, jó elgondolással igyekeztek megoldani a feladat második – véleményünk szerint – nehezebb részét.

A mérésekről készült jegyzőkönyvek nehezen értelmezhetőek, a számítási lépések nehezen követhetők voltak. A kapott eredmények értelmezése rendszerint elma-

radt. Érdekes, hogy egyesek a grafikonokon feltüntetett mérési pontokra minden áron egyenest illesztenek.

A verseny harmadik fordulóján megjelent 19 versenyző pontszáma 200 és 18 között változott, jelezve az egymástól nagyon eltérő teljesítményeket. Az összesített eredmények alapján a verseny első 10 helyezettje:

1. VARJAS DÁNIEL a dunaújvárosi Széchenyi István Gimnázium diákja 500 ponttal

2. KÓMÁR PÉTER, Budapest, Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnázium, 483

3. PÁLINKÁS CSABA, Szolnok, Versey Ferenc Gimnázium, 480

4. *Halász Gábor* (Budapest, ELTE Radnóti M. Gyakorlóiskola, 476), 5. *Kiss Péter* (Budapest, ELTE Apáczai Csere J. Gyak. Gimn., 459), 6. *Incze Attila* (Szeged, Radnóti Miklós Kísérleti Gimn., 451), 7. *Stippinger Marcel* (Sopron, Széchenyi I. Gimn., 434), 8. *Bazsó Gábor* (Szolnok, Versey F. Gimn., 411), 9. *Kis Gergely* (Budapest, Fazekas M. Főv. Gyak. Gimn., 402), 10. *Ferenczy Máté* (Budapest, Fazekas M. Főv. Gyak. Gimn., 383)

## Köszönetnyilvánítás

A verseny lebonyolításához szükséges anyagi háttérrel részben az Országos Közoktatási Értékelési és Vizsgaközpont biztosította. Ezt ezúton is köszönjük.

A verseny lebonyolításához szükséges – igen munkaigényes – eszközök esztétikus kivitelezéséért *Horváth Bélának* és *Halász Tibornak*, a megfelelő körülmények megteremtéséért *Kovács Ferencnek*, *Gál Bélának* és *Mezey Miklósnak* mondunk köszönetet. Reméljük, hogy munkájuk eredményeként a versenyzők jól érezték magukat a verseny alatt. A feladat kitűzésével, a verseny lebonyolításával kapcsolatos hasznos tanácsaiért *Tóth Andrásnak* és *Kálmán Péternek* mondunk köszönetet.

A versennyel kapcsolatos adminisztrációs és gazdasági ügyek intézéséért *Köves Endrénét* és *Gál Bélánét* illeti köszönet. Elismerés és köszönet illeti mindazokat (szülőket, tanárokat, barátokat stb.), akik segítettek a versenyzők munkáját, és ezzel hozzájárultak a verseny sikeréhez.

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

# A NIPKOW-TÁRCSÁTÓL A SZÍNES TELEVÍZIÓIG – II.

## A színes televízió

Néhány jelentősebb állomás a színes televíziózás történetéből:

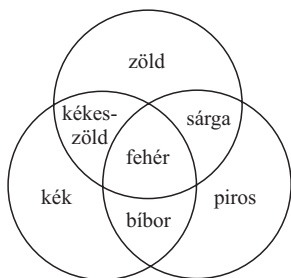
– A II. világháború miatt Európában sokáig szünetelt a televízió fejlesztése, az Amerikai Egyesült Államokban viszont gőzerővel folyt a munka.

– 1955-ben történt Amerikában az első színes helyszíni közvetítés. Ugyanakkor Európában még csak fekete-fehér készülékek üzemeltek.

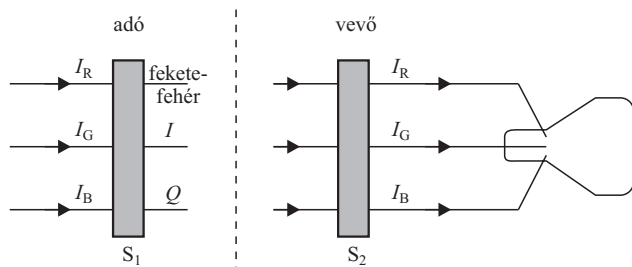
– 1970-től Európában is megjelennek a színes készülékek. A nyugat-európai országok többsége az amerikai NTSC-rendszer továbbfejlesztett változatát, a PAL-rendszert honosította meg. A kelet-európai országok a franci-

ák által használt SECAM-rendszert vették át. Manapság a legtöbb európai országban a PAL-rendszert használják. Hazánk csak a kilencvenes évektől szüntette meg a SECAM-rendszerű sugárzást.

A színes televíziós képátvitel azon a színelméleti tapasztalaton alapul, mely szerint gyakorlatilag minden szín előállítható három alapszín valamilyen arányú keveréként. (A fekete-fehér televízió tárgyalásakor már volt szó *Newton* színelméletéről.) A színes *fényképezésnél* három alapszín különbségeként kapnak egy-egy színt, vagyis a színkeverés különbségképző, *szubtraktív*. A színes *televízió* esetében három alapszínt összegezve



1. ábra. A színkeverés elve (R – piros, G – zöld, B – kék)



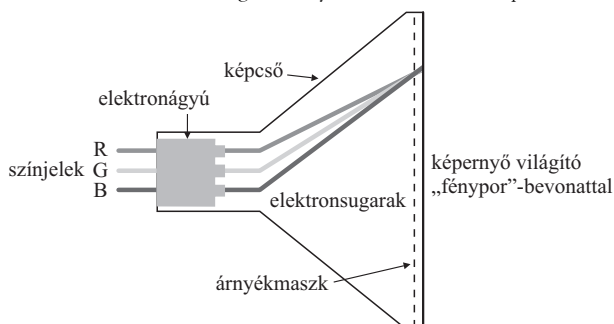
2. ábra. A színes televízióadó és a vevő elvi felépítése

állítják elő az egyes színeket, ez a színkeverés az összeadó, *additív*. A televíziónál a három alapszín a piros (R), a zöld (G) és a kék (B), ezeket megfelelő arányban összegezve érzékeljük a további színeket (1. ábra).

Az adóberendezésben fényosztókkal és színszűrőkkel piros, zöld és kék alapszínűre bontott közvetítendő képet három egység (R, G, B) veszi fel, amelyek mindegyike a neki megfelelő színes képpontok fényességét a fotoáramból kiszámítható, rendre  $I_R$ ,  $I_G$ ,  $I_B$  fényintenzitás jelével alakítja. Az így kapott három jel bonyolult elektronikus berendezésbe ( $S_1$ ), az úgynevezett színtranszformátorba jut, amelynek rendeltetése, hogy a három ( $I_R$ ,  $I_G$ ,  $I_B$ ) jelből, (egy bizonyos arányú) keveréssel egy fekete-fehéret, továbbá (a színek más arányú keverésével) egy  $I$  jelűt, és egy újabb keveréssel egy  $Q$  jelűt állítson elő, és e jelek modulálják az adóberendezés három „csatorná”-ját. A fekete-fehér csatornának itt csakis az a feladata, hogy a színes adást a távolban egyszerű fekete-fehér vevőkészülékkel is lehessen venni (2. ábra).

A vevőkészülékben is van egy színtranszformátor ( $S_2$ ), amely a fekete-fehér,  $I$  és  $Q$  jelekből az eredeti  $I_R$ ,  $I_G$ ,  $I_B$  fényintenzitásjeleket szétválasztva visszaállítja. Ez a három jel az úgynevezett trikolor-képcsőbe kerül, amelynek három elektronágyúja a három alapszínnek megfelelő luminofor- (fénypor-) felületet gerjeszti. Ez a felület

3. ábra. A háromsugaras árnyékmáskos színes képcső



különböző (lumineszcens) kristályporokból áll, amely éppen ezért háromféle energiájú elektronok becsapódására háromféle (piros, zöld, kék) színben lumineszkál. A luminoforon egy képpont itt tehát három különböző színű lumineszcenciából keletkezik. A szín tarkaságát és szűrkeségét a trikolorcső elektronágyúinak vezérlőfeszültségei szabják meg.

A színes televíziós készülék képcsővében a három katódsugár úgy van beszabályozva, hogy azok kevéssel az ernyő előtt keresztezik egymást. Mindegyik elektron-sugár egy árnyékmáskon halad át. Az árnyékmásk gondoskodik arról, hogy a megfelelő fénypontok gerjesztődjenek fényemisszióra (3. ábra). Az ilyen kép-jelátalakító csöveket jellegzetes felépítésük következtében háromsugaras árnyékmáskos színes képcsőeknek nevezik (angolul: *shadow-mask-tubes*).

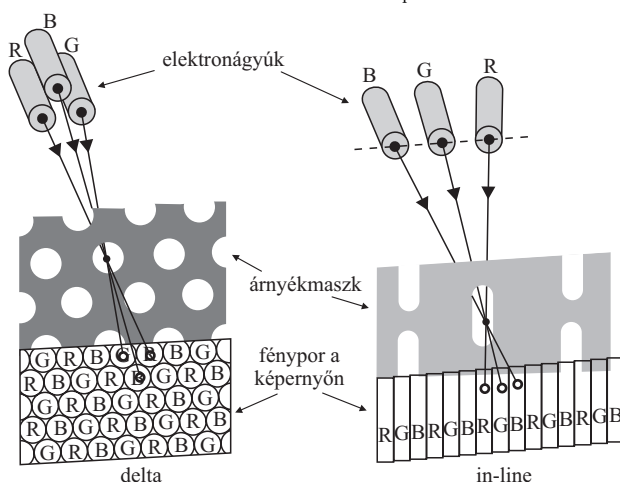
A delta szerkezetű képcsőveknél a háromféle színt előállító fénypontok háromszögben helyezkednek el, és az árnyékmáskon lyukak vannak. Az in-line rendszerű csövek maszkján viszont függőleges rések találhatók, amelyek az egymás mellett elhelyezkedő színháromsokat árnyékolják le, és a három alapszín is csík formájában helyezik el egymás mellett (4. ábra).

A képernyő pásztázása során szabályos időközönként képváltás történik, eközben viszont az elektronsugár „üresen” mozog, ezért néhány sor kihasználatlan marad. Ezeket egy újabb technikával kódolt formában többlet-információt, szöveget is továbbítanak az adás mellett. Az ilyen teletextes készülékekben van egy olyan dekóder, amely ezt a szöveget, vagyis a képűrság információit is meg tudja jeleníteni a képernyőn.

Az utóbbi időben rendkívül sokat fejlődött a technika, a cikkekben említett televíziók kora lassan lejár: hódítanak az LCD-képernyők, a digitális videoszerkesztők, megjelentek a mozifilmek DVD-n. Kevésnek bizonyult – a szemet fárasztó – 50 Hz-es képkirajzolás. A háztartásokban megjelentek a progresszív letapogatást (tehát nem váltott soros, hanem folyamatos képet alkotó) használó eszközök.

A felbontás tökéletesítése a HDTV-vel köszöntött be. Ezek a készülékek többféle üzemmódban is tudnak működni. A hagyományos 4:3-as képarányt a 16:9-es váltja

4. ábra. A delta és az in-line maszkos képcsővek színalkotása





5. ábra. A 4:3 és a 16:9 arányú képernyő, jól látható a szélesített változaton az extra képterület.

fel (5. ábra). A felbontásbeli növekedésnek köszönhetően a kép – akár egy hatalmas tévén is – tisztább, élesebb, életszerűbb, mint amelyhez hozzászoktunk.

A fejlődés tehát megállíthatatlan, a régi szabványokat lassan felváltják az újak, ami azt jelenti, hogy előbb-utóbb korszerűbb készüléket kell vásárolnunk.

Mester András  
Diósgyőri Gimnázium

#### Irodalom

1. E. AISBERG: *Most már értem a televíziót* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1958
2. BERNOLÁK K.: *A fény* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981
3. BUDÓ Á.: *Kísérleti fizika II.* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1971
4. BUDÓ Á., MÁTRAI T.: *Kísérleti fizika III.* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1977

5. W.R. FUCHS: *Az elektronok világa* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976
6. SIMONYI K.: *A fizika kultúrtörténete* – Gondolat Kiadó, Budapest, 1978
7. S. TÓTH F. (szerk.): *Rádió és televízió műszaki alapismeretek kézikönyve* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983
8. [http://ismaker.uw.hu/g\\_interlace\\_h.html](http://ismaker.uw.hu/g_interlace_h.html)
9. [http://www.mozaik.info.hu/MozaWEB/Feny/FY\\_tv.htm](http://www.mozaik.info.hu/MozaWEB/Feny/FY_tv.htm)
10. <http://www.antiquewireless.org/museum/baird75.htm>
11. <http://www.videouniversity.com/farnhal.htm>
12. <http://www.etedeschi.ndirect.co.uk/database/it.tv.htm>
13. <http://www.doom9.org/index.html?video-basics.htm>
14. <http://historytv.net/>
15. <http://www.mztv.com/newframe.asp?content=http://www.mztv.com/pioneers.html>
16. <http://www.snellwilcox.com/knowledgecenter/glossary/>
17. <http://www.sulinet.hu/fizika/kosaa/teve1.html>
18. <http://www.tkk.fi/Misc/Electronics/circuits/vga2tv/glossary.html>
19. [http://www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/e\\_fern.htm](http://www.deutsches-museum.de/ausstell/meister/e_fern.htm)

## KVARKANYAG VILÁGKONFERENCIA BUDAPESTEN

– a 2005. évi fizikai Nobel-díjas Roy Glauber részvételével

2005 nyara nagyon izgalmasan alakult a magyar kvarkanyag-kutatók számára: augusztus 4. és 9. között Budapesten, az ELTE TTK lágymányosi fizika épülettömbjében került megrendezésre szakterületünk világkonferenciája, a *Quark Matter konferencia*. A magyarországi nehézion-fizikai kutatások nemzetközi elismerését jelentette, hogy az olaszországi Torinó, az amerikai Stony Brook, a francia Nantes és a szintén amerikai Oakland után a 18. Quark Matter konferenciát (QM'05) Magyarországon, Budapesten rendezhettük. Szakterületünkön hagyomány, hogy az óriási erőfeszítéssel megépített gyorsítók és mérőberendezések legújabb, előzetes adatait a világon először ezen a konferencián jelentik be, és itt vitatják meg először lehetséges elméleti értelmezéseiket. Számos környező ország (Ausztria, Csehország, Lengyelország, Románia, Szlovákia és Ukrajna) fizikusai is kitüntetett figyelemmel kísérték rendezvényünket, és ahhoz kapcsolódva 50–100 főt felvonultató elő- és utókonferenciákat szerveztek. Számukra is nagy eseményt jelentett, hogy hazánk nyerte el a világkonferencia-sorozat 2005. évi eseményének rendezési jogát, megelőzve ezzel egy közös kínai-japán, valamint egy portugál pályázatot. A kutatási területünk legkiemelkedőbb eseményére végül 5 kontinens 31 országának 610 képviselője, köztük több mint 200 fiatal kutató jött el Budapestre.

A rendezvény sikerét a kiváló csapatszellemű szervezőmunka biztosította, és az ELTE TTK fizika épülettömbjének magasszintű szolgáltatásai tették lehetővé. A magyar kutatóközösség (diákokkal együtt közel 50 fő) nagy várakozásokkal nézett az esemény elé, mert így mindannyian betekintést nyerhettünk a legújabb eredményekbe, és azonnal megismerhettük a nemzetközi közösség reakcióját is.

A konferencia nulladik, bevezető napján angol nyelvű felkészítő előadásokat szerveztünk, ahol szakavatott kollégák, köztük *Biró Tamás*, *Csernai László* és *Varga Dezső* foglalták össze a kutatási terület alapproblémáit és a korábbi ismert eredményeket a doktoranduszoknak és ifjú kutatóknak. Összesen tíz bevezető előadás hangzott el. Párhuzamosan „Tanárnap”-ot is szerveztünk magyar nyelvű előadásokkal, amelyre meghívtuk a középiskolai fizikatanárokat és a diákok képviselőit, amelyen végül közel 60 fő töltötte meg az előadótermet. Először *Németh Judit* akadémikus foglalta össze nagyon szemléletesen az ósanyag-kutatás eddigi eredményeit, majd *Siklér Ferenc* a CERN-ben folyó kísérleti munkáról beszélt. *Fái György* professzor a QM'05 konferencián várható eredményeket, azok fontosságát igyekezett megvilágítani az érdeklődő közönségnek. Végezetül *Horváth Zalán* akadémikus, az MTA Fizikai Tudomány Osztályának elnöke tartotta meg előadását *Einstein Csodálatos Éve – 1905* címmel. Ezáltal a QM'05 konferencia a Fizika Nemzetközi Éve – 2005 alkalmából meghirdetett eseménysorozat kiemelkedő rendezvényévé vált. Élő kapcsolat jött létre a konferencián megjelenő világhírű kutatók, a középiskolai fizikatanárok és a fizikában kiemelkedő eredményeket elérő diákok között. A hosszúra nyúlt nulladik napot közös esti program zárta, amelyen *Michaletzky György*, az ELTE TTK dékánja köszöntötte a konferencia és a Tanárnap résztvevőit.

A QM'05 konferencia augusztus 4-én *Kroó Norbert*, az MTA alelnökének megnyitó beszédével kezdődött el – *Mádl Ferenc*, a konferencia fővédnöke sajnos nem tudott személyesen jelen lenni. Ezt követően *Roy Glauber*, az USA Harvard egyetemének professzora, a nehézion-ütközések frontálisságának meghatározására használt Glau-

ber–Gribov-modell atya tartott előadást *Diffrakcióelmélet, kvantumoptika és nehézion-fizika* címmel. Második szakmai előadónk *Luciano Maiani*, a CERN egykori főigazgatója volt, aki a CERN-i nehézion-kísérletek eredményeiről beszélt. Ezt követően *Zimányi József*, a magyarországi nehézion-fizikai kutatások egyik megalapítója és meghatározó személyisége a kvarkanyagról és a kvarkkoaleszcencia-modellről, valamint annak sikeres alkalmazásáról tartott előadást. Igen nagy örömeinkre szolgált az 2005. október 4-én kelt hír, miszerint konferenciánk első szakmai előadója, az amerikai Roy Glauber nyerte el az idei fizikai Nobel-díjat, a szintén amerikai *John Hall* és a német *Theodor Hänsch* fizikusokkal megosztva.

Nagy várakozás előzte meg az USA Brookhaveni Nemzeti Kutató Intézete (BNL) Relativisztikus Nehézion-Ütköztetője (RHIC), valamint az Európai Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet, a CERN Szuper Proton-Szinkrotron (SPS) gyorsítója mellett végrehajtott kísérletek összefoglaló előadásait, amelyekben a legújabb és egyben legfontosabb kísérleti eredmények kerültek bemutatásra rögtön az első napon. A hallgatóság nem csalódott, mert a 6 óra alatt számos új eredményről értesülhetett. Ezek további fontos részletekkel gazdagították a CERN SPS nehézion-fizikai programját értékelő 2000-ban tartott sajtóbejelentés tartalmát, valamint a BNL RHIC 2003-as sajtóbejelentését olyan új anyag felfedezéséről, melyben a nagyenergiájú részecskék áthaladás közben elnyelődnek, valamint a BNL RHIC 2005-ben tartott sajtótájékoztatóján elhangzott megállapítást, mely szerint ez az ősi-új anyag, melyen a részecskeugarak (*jetek*) elnyelődnek, és amely az Ősrobbanás után néhány milliómod másodpercre az egész Világegyetemünket kitöltötte, belső sűrűlódás és hővezetés nélküli, tökéletes folyadékként viselkedik. A várakozásokat igazolta, de fontos volt látni, hogy a PHENIX Együtműködés által kimért foton spektrum nagy impulzusoknál nem mutatta azt az elnyelődést, amelyet az erős kölcsönhatásban részt vevő, részecskeugarakban keletkező pionok, protonok, sőt minden mért, kvarkokból álló elemi részecske esetében jól látunk, egészen nagy transzverzális impulzusértékekig. Ezért arra következtettünk, hogy a reakcióban olyan új anyag keletkezik, amely erősen kölcsönható kvarkokból és gluonokból áll. A fotonok impulzuseloszlása ugyanakkor fontos információt hordoz a reakció kezdetén létrejövő óriási hőmérsékletekről, melyek értékére a kísérleti adatok és az első modellszámítások összevetéséből a mintegy 300–400 MeV-es érték adódott. Ugyanakkor meglepetést keltett a nagy tömegű bájos kvarkot tartalmazó D-mezon spektrumában megjelenő *elnyomás*, amelyet az elméleti számítások korábban nem mutattak, és az a mérési eredmény, mely szerint még ezek a nagy tömegű bájos kvarkok is részt vesznek a forró és sűrű, erősen kölcsönható anyag kollektív folyásában. A nagyenergiás jetek szögeloszlásában megjelenő anomáliák bemutatása pedig egyenesen szenzációs volt, mert nem értjük, hogy lökéshullámok, gluonikus Cserenkov-sugárzás, vagy valamilyen más effektus hozza-e őket létre. Ezen mérések részletes vizsgálatából várható majd a hangsebesség és a szín-dielektromos állandó pontos kísérleti meghatározása is, amelyek a RHIC-kísérletekben keletkezett folyadékserű állapot pontos leírásához lesznek majd szükségesek. Sok eredményt utalt a kialakult forró anyag nagyfokú kollektivitására, a szabaddá vált kvark szabadsági fokok intenzív kölcsönhatására. A bemutatott eredmények egyre nyilvánvalóbban azt támasztják alá, hogy a nehézion-ütközésekben keletkezett állapot valójában egy erősen kölcsönható anyag: nem a korábban várt szabad kvarkok és gluonok *gázserű állapota*, hanem inkább egy kvarkokat és gluonokat tartalmazó *folyadék*. A végső konklúzióhoz szükséges e folyadék állapot-egyenletének pontos kísérleti meghatározása, amely munkához a kísérleti és elméleti kutatók közötti fokozott együttműködésre lesz szükség. Konferenciánkon megismerhettük a CERN-energián kimért nagy impulzusú részecskék spektrumát is, az NA49-kísérletben 2 GeV-es transzverzális impulzusértékekig tudtuk kiértékelni az adatokat. Ebben a munkában magyar kollégák is aktívan részt vettek, *László András* (NA49-kísérlet, MTA KFKI RMKI) tartott előadást erről az egyik a parallel szekcióban.

Az új kísérleti eredmények ismertetését azok értelmezése, a legjobb eredményekkel való összevetése, a különböző detektoroknál kapott eredmények szintetizálása követte. A konferencia 5 teljes napot kitevő tudományos programja nagyon szerveázó volt: 42

plenáris előadás keretében összefoglaló előadások hangzottak el, és a parallel szekciók 116 rövidebb előadásában a legújabb eredmények részletes ismertetése történt meg. Külön örömeinkre szolgált, hogy a plenáris előadások közül hármat magyar kutatók tartottak: *Katz Sándor* (ELTE) a kvarkanyag állapotegyenletére kapott rács-QCD-re vonatkozó számításait ismertette, *Veres Gábor* (ELTE) az alacsony impulzusú részecskék keltéséről szerzett kísérleti adatokat foglalta össze, *Molnár Dénes* (Ohio State University) pedig az erősen kölcsönható kvarkanyagban lezajló transzportfolyamatokat értékelte. A parallel előadások közül további 9-et tartott magyar kolléga. Közülük *Ster András* (RMKI/ATKI) a keletkezett forró anyag hidrodinamikai viselkedésének elméleti és kísérleti aspektusairól beszélt, a világon először adva precíz leírást a PHOBOS-kísérlet által mért rapiditásfüggő elliptikus folyás gerjesztési függvényére, a Buda–Lund-modellen és a tökéletes folyadékképpen alapuló univerzális adategybejtő skálaviselkedést tárva fel. *Csanád Máté* (ELTE) a PHENIX-kísérletben részt vevő magyar kutatócsoport munkájára hívta fel a figyelmet, bizonyos különleges tulajdonsággal rendelkező részecskék, az  $\eta'$ -mezonok lehetséges tömegmódosulására utaló kísérleti jeleket összegezve, valamint kvantumoptikai módszerekkel meghatározva a BNL RHIC gyorsító arany-arany ütközéseiben fellépő kaotikus és koherens források arányait. *Biró Tamás* (RMKI) a nehézion-ütközésekben keletkező nemegyensúlyi részecskeeloszlások területén elért eredményeit ismertette, *Barnaöldi Gergely* (RMKI) és Fái György (Kent State University) a nagyenergiás részecskeprodukción, a jet-jet korreláció és a kvarkok elnyelődésének vizsgálata területén elért legújabb eredményeiket mutatták be. *Hartmann Péter* (SZFKI) az erősen kölcsönható klasszikus plazmákról szerzett ismeretei alapján nagy sikerrel modellezte a kvarkanyagban végbemenő kölcsönhatási folyamatokat, és meghatározta a kvarkanyagra jellemző párkorrelációs függvényt.

Az igen feszített tudományos program mellett a résztvevők a Bartók Néptáncgyűttes tolmácsolásában bepillantást nyertek a magyar néptáncok gazdag világába, balatoni és tokaji borokat kóstolhattak, és megismerkedhettek a Duna-kanyar szépségeivel. A konferenciakirándulás során a résztvevők megtekinthették a csallóközi lovasjászok bemutatóját és a Szent György Lovagrend középkori harci játékeit is. A magyarországi konferencia szakmai és kulturális színvonala nagy kihívás elé állította a kínai kollégákat. A következő Quark Matter konferenciára ugyanis Sanghajban kerül sor 2006 őszén.

A konferencia sikeréhez nagyban hozzájárult, hogy az ELTE és az RMKI közös rendezésében zajlott az Eötvös Egyetem látványos konferenciaközpontjában. Habár a konferencia helyi szervezése a magyar kollégák vállán nyugodott, a környező országok képviselőiből létrehozott *Regional Advisory Committee* (RAC) és a konferenciasorozatot felügyelő *International Advisory Committee* (IAC) tagjai is nagyban hozzájárultak a konferencia szakmailag sikeres megrendezéséhez. Közvetve, illetve közvetlenül anyagi támogatást nyújtott a Magyar Tudományos Akadémia, az OTKA, a NATO és a NEFIM, a Bluefish Computers és a Promontor Píncészet, az Elsevier és az IOP kiadók, valamint az American Physical Society. Az amerikai Brookhaven National Laboratory (BNL), a svájci CERN és a német GSI/FAIR célzott támogatása mintegy 100 diák részvételét tette lehetővé. Összességében 152 résztvevő számára nyújthattunk különböző mértékű segítséget a konferencián való részvétellel.

A Quark Matter világkonferencia rendezési jogának elnyerése és a konferencia sikeres lebonyolítása a Zimányi József, Németh Judit és *Lovas István* akadémikusok által alapított hazai nehézion-fizikai iskola rangját, a magyar fizikusok szellemi teljesítményének kiemelt nemzetközi elismertségét jelzi.

*Lévai Péter* QM'05 elnök

*Csörgő Tamás* QM'05 társelnök

MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet

Kapcsolódó weboldalak:

<http://qm2005.kfki.hu/> – a QM'05 konferencia hivatalos weblapja

<http://www.kfki.hu/events/hun/qm2005/> – a QM'05 konferencián elhangzott előadások archívuma (előadások, videofelvételek, fotók)

<http://www.kfki.hu/~csorgo/press/050809/> – a konferencia első sajtóközleménye

<http://www.kfki.hu/~csorgo/press/051005/> – a konferencia második sajtóközleménye