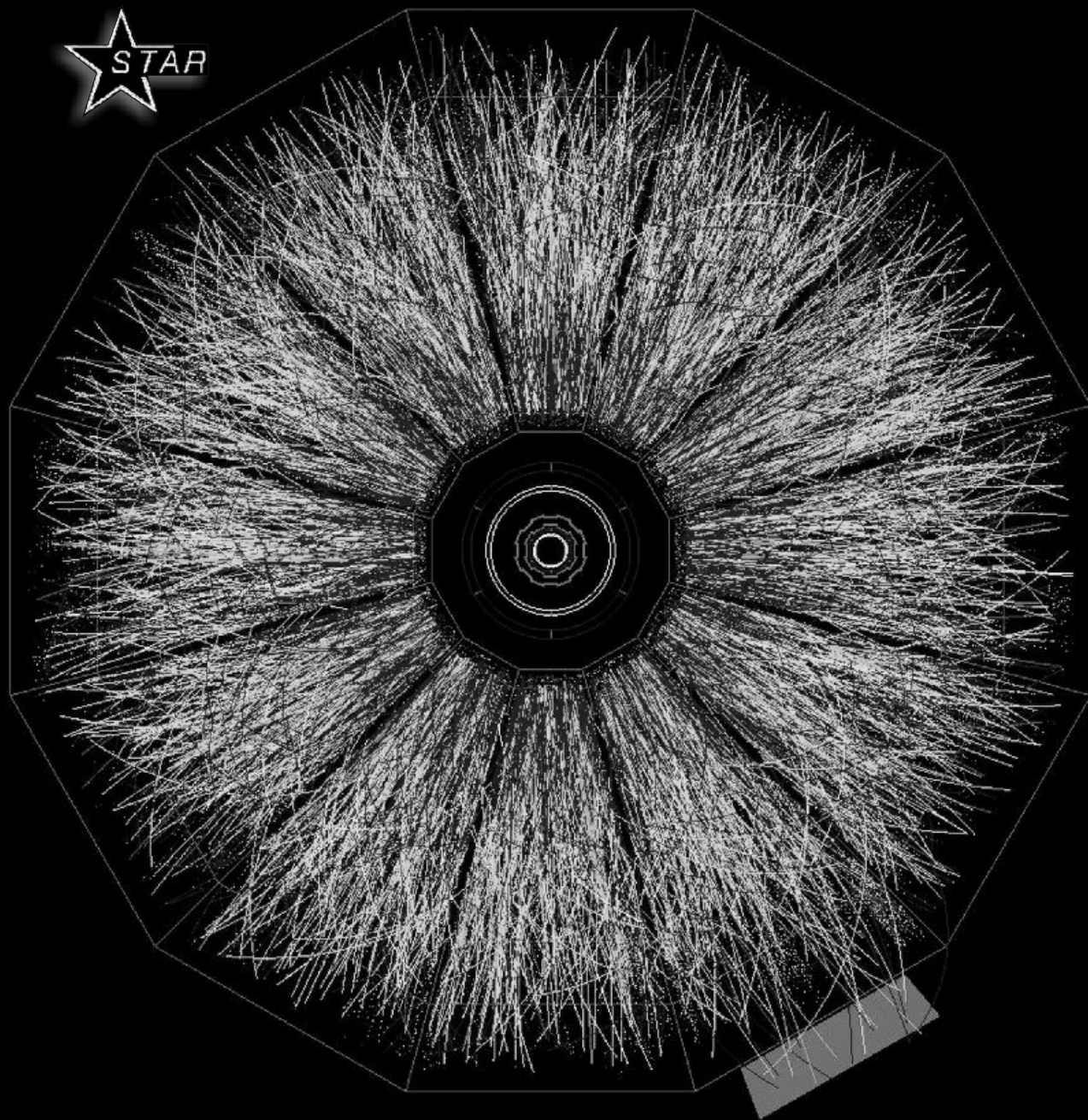


fizikai szemle



2006/10

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A brookhaveni relativisztikus nehézion-
ütköztetőben (RHIC) 100 GeV energiájú
arany atommagok ütközésekor létrejövő
„esemény”, ahogyan azt a leginkább egy
3-dimenziós digitális kamerához
hasonlítható STAR detektorral látják.

TARTALOM

<i>Ádám Péter, Janszky József:</i> Koherens állapotok a kvantumoptikában	325
<i>Ormai Péter:</i> Radioaktív hulladékok elhelyezése	329
<i>Bíró Tamás Sándor:</i> Elosztott tömegek a kvarkanyagban	334
<i>Gruiz Márton, Radnai Gyula, Tél Tamás:</i> A rugalmas fonálú ingáról – mai szemmel	337
Beszélgetés a 75 éves Lovas Istvánnal (<i>Sailer Kornél</i>)	343
Most lenne 60 éves – megemlékezés Ferenczi Györgyről (<i>Mojzes Imre</i>)	348
Hommage à Ferenczi György (<i>Hermann G. Grimmeiss</i>)	349
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Gyarmati Csaba:</i> Gyorsan bemutatható Foucault-inga kísérlet	350
Csodatorony Szegeden (<i>Nánai László</i>)	352
HÍREK – ESEMÉNYEK	
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
Szuperötvetzet egykristályok – drágakövek a gázturbinákban (<i>Lendvai János</i>)	356

P. Ádám, J. Janszky: Coherent states in quantum optics

P. Ormai: The disposal of radioactive waste

T.S. Bíró: Mass distributions in quark matter

M. Gruiz, J. Radnai, T. Tél: The pendulum with an elastic string – the modern approach

A talk with 75-years old academician I. Lovas (*K. Sailer*)

By now he would be 60 years old – I. Mojzes' remembrances of G. Ferenczi

Hommage à G. Ferenczi (*H.G. Grimmeiss*)

TEACHING PHYSICS

Cs. Gyarmati: A quick Foucault pendulum experiment

The "Magic Tower" at Szeged (*L. Nánai*)

EVENTS

SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

Superalloy monocrystals – jewels within gas turbines (*J. Lendvai*)

P. Ádám, J. Janszky: Kohärente Zustände in der Quantenoptik

P. Ormai: Die Absorgung radioaktiver Abfälle

T.S. Bíró: Massenverteilungen in der Quark-Materie

M. Gruiz, J. Radnai, T. Tél: Pendel mit elastischen Fäden in moderner Sicht

Ein Gespräch mit Akademiemitglied I. Lovas zu seinem 75. Geburtstag (*K. Sailer*)

Er wäre jetzt 60 Jahre alt. Zum Andenken an G. Ferenczi (*I. Mojzes*)

Hommage à G. Ferenczi (*H.G. Grimmeiss*)

PHYSIKUNTERRICHT

Cs. Gyarmati: Ein schnell vorführbares Experiment mit dem Foucaultschen Pendel

Der „Zauberturm“ in Szeged (*L. Nánai*)

EREIGNISSE

WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Eincristalle aus Superlegierungen – Juwelen in Gasturbinen (*J. Lendvai*)

И. Адам, Й. Янски: Когерентные состояния в квантовой оптике

И. Ормай: Хранение радиоактивных отходов

Т.Ш. Биро: Распределение масс внутри кваркового вещества

М. Груиз, Д. Раднаи, Т. Тэл: Маятник с упругой нитью – современный подход

Разговор с 75-летним академиком И. Ловаш (*К. Саилер*)

Ему было бы 60 лет – воспоминание о Д. Ференци (*И. Мойзеи*)

Дьердь Ференци, выдающаяся личность (*Г.Г. Груммеис*)

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Ч. Дьярмати: Скорый демонстрационный опыт с маятником Фуко

«Волшебная башня» в г. Сегед (*Л. Нанай*)

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Монокристаллы из супер-расплавов – ценности внутри газовых турбин (*Я. Лендвай*)

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

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

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

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

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

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

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

HU ISSN 0015-3257

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

10. szám

2006. október

KOHERENS ÁLLAPOTOK A KVANTUMOPTIKÁBAN

Ádám Péter, Janszky József
MTA SZFKI, PTE TTK Fizikai Intézet

Roy J. Glauber 2005-ben Nobel-díjat kapott az optikai koherencia kvantumelméletének és a koherens állapot reprezentációjának a kidolgozásáért. Ezeket az eredményeket 1963-ban több cikkben közölte [1, 2]. Különös érdeme, hogy rámutatott: olyan optikai jelenségek, problémák tárgyalására, ahol a fény kettős, hullám–részecske természete megnyilvánul, a kvantumelektrodinamikai leírást kell alkalmazni. Ezért Glaubert méltán tekinthetjük a kvantumoptikai kutatások elindítójának. Eredményei alapozzák meg ezt az elmúlt évtizedben rendkívül sikeres, jelentős gyakorlati eredményeket is hozó kutatási területet. Jelen írásunkban Glauber eredményeinek és a koherens állapotok jellemzőinek rövid áttekintése mellett néhány olyan kvantumoptikai eredményt mutatunk be, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a koherens állapotokhoz, illetve a Glauber által bevezetett reprezentációhoz.

A koherens állapot

A fény kettős természetének értelmezése a 20. század elején a fizika egyik legizgalmasabb kérdése volt. A fény a terjedésénél észlelt minden jelenség során hullámként viselkedik. Ezeket a jelenségeket *Maxwell* elektromágneses elméletével, illetve a hullámoptika egyenleteivel tökéletesen leírhatjuk. A fény elnyelődése, kibocsátása azonban a tapasztalat szerint „adagokban” történik, a fény ilyenkor részecskeként viselkedik. *Einstein* 1905-ben vetette fel, hogy az ω körfrekvenciájú fény $\hbar\omega$ energiájú csomagokból áll. Ezeket később fotonoknak nevezték el. A fény kettős természetét egységesen tárgyaló elmélet alapja azonban csak az 1920-as évek végén, *Dirac* munkája nyomán született meg. Ezen elmélet szerint a sugárzási teret a klasszikus elektrodinamika törvényeinek megfelelően egy adott térrészben módusokra bontjuk, például adott polarizációjú és frekvenciájú síkhullámokra. Minden módushoz egy harmonikus oszcillátort ren-

delhetünk úgy, hogy az oszcillátor energiája megegyezzen a térmódus energiájával. Az oszcillátort ezután kvantáljuk, azaz a kvantummechanika elmélete szerint tárgyaljuk. Ennek megfelelően a tér normálmódusainak energiaspektruma diszkrét és egyenközű. Ha a módus az n -edik sajátállapotban van, akkor azt mondjuk, hogy a módusban n foton van. A fotonszám tehát a módus gerjeszttségének a mértéke. Az n -fotonos állapot jelölésére az $|n\rangle$ szimbólumot használjuk. A kvantummechanikai tárgyalásnak megfelelően a fizikai mennyiségeknek operátorok felelnek meg. Példaként tekintsük egyetlen, ω_k körfrekvenciájú, k hullámszámvektorú, \vec{e}_k polarizációjú síkhullámmódus esetén az elektromos térerősség operátorát, amely egy pozitív és egy negatív frekvenciás tagra bontható:

$$\hat{E}(r, t) = \hat{E}^+(r, t) + \hat{E}^-(r, t) = i\vec{e}_k \sqrt{2\pi\hbar\omega_k} \left(\hat{a}_k e^{i(kr - \omega_k t)} + \hat{a}_k^\dagger e^{-i(kr - \omega_k t)} \right). \quad (1)$$

Láthatjuk, hogy a kvantumelektrodinamikai leírásban a hullámtulajdonságok az exponenciális tagokban megőrződnek, de megjelennek a foton elnyelődését leíró \hat{a}_k eltüntető és \hat{a}_k^\dagger keltő operátorok. Az eltüntető operátor egy fotonnal csökkenti a tér gerjeszttségét:

$$\hat{a} |n\rangle = \sqrt{n} |n-1\rangle, \quad (2)$$

a keltő operátor pedig egy fotonnal növeli azt:

$$\hat{a}^\dagger |n\rangle = \sqrt{n+1} |n+1\rangle. \quad (3)$$

Glauber egyik korszakalkotó eredménye, hogy a kvantumelektrodinamikát alkalmazta a fotondetektálás leírására, valamint a fotonkorrelációs interferenciakísérletek értelmezésére. A fény koherenciátulajdonságainak jellemzésére bevezette a kvantumkoherencia-függvénye-

ket, amelyek a megfelelő tér- és időpillanatban vett pozitív és negatív frekvenciás térerősség-operátorok normálrendezett átlagértékei a sugárzási tér adott állapotában. A normálrendezés azt jelenti, hogy a negatív frekvenciás térerősség-operátorok a pozitív frekvenciás térerősség-operátoroktól balra állnak. A fotondetektálás valószínűsége a tér egy adott pontjabeli intenzitás átlagértékével, amit az úgynevezett elsőrendű koherenciafüggvény

$$G^{(1,1)}(r, t, r, t) = \langle E^-(r, t) E^+(r, t) \rangle \quad (4)$$

ír le, arányos. Egy fotonkoincidencia-kísérlet értelmezéséhez – ilyen például a már 1956-ban elvégzett nevezetes *Hanbury-Brown–Twiss-kísérlet* – másodrendű koherenciafüggvényre van szükség:

$$G^{(2,2)}(r_1, t_1, r_2, t_2) = \langle E^-(r_1, t_1) E^-(r_2, t_2) E^+(r_1, t_1) E^+(r_2, t_2) \rangle. \quad (5)$$

Általánosan a tér $2n$ különböző pontja és időpillanata között a korrelációt egy n -edrendű koherenciafüggvény fejezi ki, amely n negatív és n pozitív frekvenciás térerősség-operátor szorzatának átlagértéke.

A koherenciafüggvények segítségével definiálhatjuk a sugárzási tér koherens állapotát. Az ilyen állapotú fény teljesen összefüggő, bármely rendű interferenciára képes. A tér bármely pontjában vett, bármely rendű normált koherenciafüggvény maximális értékű. Glauber megmutatta, hogy matematikailag az ilyen állapot az eltüntető operátor sajátállapota, tehát az

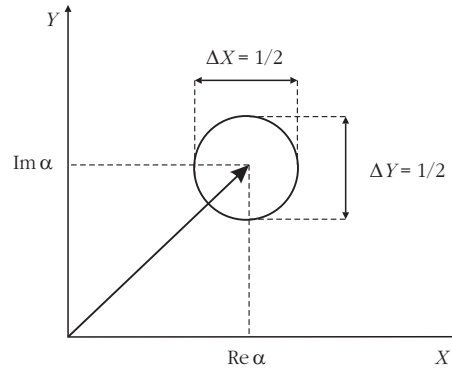
$$\hat{a} |\alpha\rangle = \alpha |\alpha\rangle$$

egyenletet elégíti ki, ahol $\alpha = |\alpha| e^{i\varphi}$ komplex paraméter. Ezt a kvantumállapotot a harmonikus oszcillátor kvantumelméletéből ismerhetjük. A koherens állapot az oszcillátor klasszikus mozgásának megfelelő kvantumállapot. Fény esetében a példaként tekintett módusfelbontás esetén ez a monokromatikus síkhullámnak felel meg. A koherens állapot komplex paraméterének abszolút értéke $|\alpha|$ arányos a hullám amplitúdójával, φ fázisa a hullám kezdőfázisa. A kvantumosság tárgyalásból következően azonban az elektromos térerősségnek bizonytalansága van, amely fázisfüggetlen és értéke állandó, megegyezik a vákuumzajjal. A koherens állapotú fény így növekvő gerjesztettség mellett egyre jobban megfelel a klasszikus hullámnak, hiszen a kvantumzaja elhanyagolható lesz az amplitúdójához képest. Érdekes megemlíteni, hogy egy ideális lézer koherens állapotú fényt bocsát ki. Glauber elméleti eredményeit, kétségkívül, az első lézereknek a '60-as évek elején történt kifejlesztése is motiválta.

A koherens fény nevezetes jellemzője, hogy fotonstatisztikája, tehát az n -fotonos állapotok eloszlása Poisson-eloszlás, azaz

$$P(n) = |\langle \hat{n} |\alpha\rangle|^2 = \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} \exp(-|\alpha|^2). \quad (7)$$

A fotonszám középértéke és szórásnégyzete megegyezik és egyenlő az amplitúdó abszolút értékének négyzetével.



1. ábra. A koherens állapot szemléltetése a fázistérben. A kör az állapot kvantummechanikai bizonytalanságát szemlélteti.

$$(\Delta \hat{n})^2 = \langle \hat{n} \rangle = |\alpha|^2. \quad (8)$$

Koherens fény esetén a fotondetektálási események teljesen függetlenek egymástól, köztük semmilyen korreláció nincsen. Tehát ez a fény nem mutatja sem a fotoncsomósodás (bunching), sem a fotonritkulás (anti-bunching) jelenségét, az egyes események közt eltelt időintervallumok exponenciális eloszlásúak. A fotoneloszlás egy fotondetektálási kísérletben az adott időintervallumban beérkezett fotonok számának valószínűségeloszlásából határozható meg.

Glauber másik jelentős eredménye annak felismerése, hogy koherens állapotok segítségével a fény tetszőleges kvantumállapota reprezentálható. Korábban rendszerint a fotonszám állapotok, tehát az energia-sajátállapotok által alkotott bázist használták kvantumelektrodinamikai számításokhoz. A koherens állapot reprezentációt az teszi lehetővé, hogy bár két koherens állapot nem ortogonális egymásra, a koherens állapotok teljes bázist alkotnak az adott módust leíró harmonikus oszcillátor állapotterében. A reprezentációt szemléletesé teszi, hogy a koherens állapotok α paramétere által meghatározott komplex sík megfelel a kvantummechanikai fázistérnek. Ennek koordinátatengelyeit fény esetében az úgynevezett \hat{X} és \hat{Y} kvadratúraoperátorok átlagértékei adják. Ezekkel az operátorokkal a tér rezgéseit a klasszikus eljárásnak megfelelően két, $\pi/2$ fáziskülönbségű, egymásra merőlegesen oszcilláló mennyiségre bontjuk. A kvantummechanikai leírásban a két kvadratúraoperátor kanonikusan konjugált, tehát a kvadratúrák nem mérhetőek egyszerre, szórásaikra teljesül a

$$\Delta \hat{X} \Delta \hat{Y} \geq \frac{1}{4} \quad (9)$$

Heisenberg-féle határozatlansági reláció. Az 1. ábrán a koherens állapotnak megfelelő pontot a kvantummechanikai bizonytalanságot is mutató körrel ábrázoltuk a fázistérben. A dimenziótlan kvadratúramennyiségek bizonytalansága egyenlő nagyságú és minimális, azaz a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés egyenlőségként teljesül. A koherens állapotnak megfelelő pont az időbeli fejlődés során ω körfrekvenciával forog a fázistér origója körül.

A fázistéren értelmezhetünk úgynevezett kvázivalószínűség-eloszlásfüggvényeket, a klasszikus statisztikus fizi-

ka fázistérbeli eloszlásfüggvényeirehasonlóan. (Ilyen például a *Wigner Jenő* által 1932-ben bevezetett Wigner-függvény.) Ezekkel a fény kevert állapotait is jellemezhetjük, amelyek nem írhatók le egyetlen állapotvektorral. Az egyik legjellegzetesebb példa kevert állapotra a termikus állapot, amely egy termikus fényforrás, például egy egyszerű izzólámpa fényét írja le. Glauber a kevert állapotokat leíró sűrűségoperátor reprezentálására a $P(\alpha)$ kvázivalószínűség-eloszlást vezette be, amellyel egy kevert kvantumállapot $\hat{\rho}$ sűrűségoperátora a következő diagonális alakba írható:

$$\hat{\rho} = \int P(\alpha) |\alpha\rangle\langle\alpha| d^2\alpha. \quad (10)$$

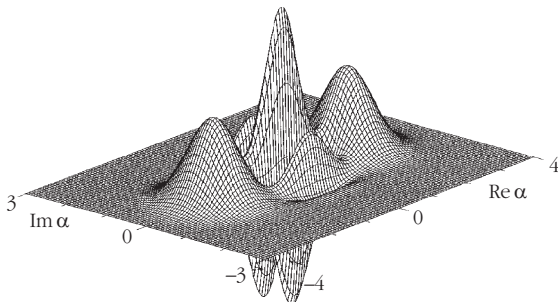
A sűrűségoperátor tehát a koherens állapotokra vetítő projektor-operátorok a teljes fázistéren $P(\alpha)$ súlyfüggvénnyel vett keveréke. A Glauber-féle P -függvény bizonyos problémák tárgyalásakor matematikailag előnyösebb tulajdonságokkal rendelkezik, mint más kvázivalószínűség-eloszlásfüggvények.

Glauber megmutatta azt is, hogy a kvantummechanikai eloszlásfüggvények nem tekinthetők a klasszikus eloszlásfüggvények egyértelmű megfelelőjének. Ezek a függvények a klasszikus megfelelő nélküli kvantumállapotokban ugyanis negatív értéket is felvehetnek. A lézerek megjelenése előtt csak termikus fényforrásokat ismertünk. A termikus fény $P(\alpha)$ függvénye Gauss-függvény, ezért alkalmazható a vele végzett kísérletek értelmezésére a klasszikus fluktuációelmélet. Természetesen a koherens fényvel végzett kísérletek is értelmezhetőek a klasszikus elmélettel. Érthető módon a Glauber eredményeit követően megindult kvantumoptikai kutatások egyik fő célja a fény nevezetes nemklasszikus állapotainak megtalálása, leírása és előállításuk volt.

A fény nemklasszikus állapotai

A fénynek végtelen sok kvantumállapota létezhet. A fény kvantumállapota általában megváltozik, ha valamilyen optikai folyamatban vesz részt. Megváltozik az állapota akkor is, ha detektáljuk, hiszen fotonok abszorbeálódnak a tőrből. Egy tiszta kvantumállapotú fény kevert állapotúvá válik, ha csillapodási folyamatban vesz részt. A csillapodás alapesete egy részlegesen átteresztő tükrön való áthaladás. Valójában csak a koherens állapotú és a termi-

2. ábra. A páros Schrödinger-macska állapot Wigner-függvénye a fázistérben. A két Gauss-harang a koherens állapotoknak felel meg, a hullámzó rész a kvantuminterferenciát mutatja.



kus fény tekinthető klasszikusnak. Ezek kvantumállapota a csillapodási folyamatban sem változik, csak intenzitásuk csökken.

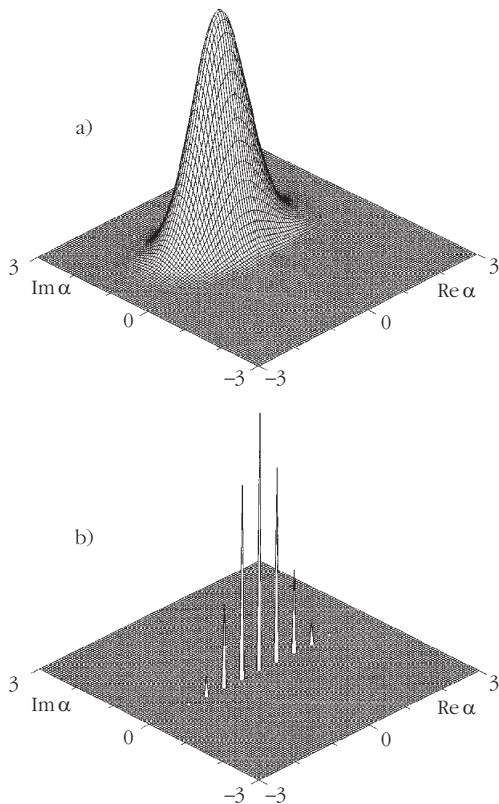
A fény nemklasszikus állapotai között vannak nevezetes tulajdonságúak, amelyekkel kapcsolatos kutatások már a '70-es évek elején megindultak. Legtöbb figyelmet az összenyomott (squeezed) fény kapott. Az ilyen fénynek az a jellemző tulajdonsága van, hogy valamelyik mérhető fizikai mennyiségének kvantumzaja kisebb, mint koherens állapotban. A konkrét elnevezés tartalmazza annak a fizikai mennyiségnek a megnevezését, amelynek bizonytalansága kisebb a koherens értéknél. Például az amplitúdó-összenyomott fény fotonszám-szórása kisebb a koherens fényénél ($(\Delta \hat{n})^2 < \langle \hat{n} \rangle$), fotonszám-eloszlása pedig keskenyebb, mint a Poisson-eloszlás, azaz szub-Poisson statisztikájú.

Kvadratúra-összenyomott állapotban az egyik kvadratúramennyiség szórása kisebb, mint a koherens érték ($\Delta \hat{X} < 1/2$ vagy $\Delta \hat{Y} < 1/2$). A Heisenberg-féle határozatlansági összefüggésnek megfelelően természetesen a másik mennyiség zaja megnő. Az ilyen állapotot egy ellipszisszel ábrázolhatnánk az 1. ábrán bemutatott fázistérben. Kvadratúra-összenyomott vákuumállapotot úgynevezett optikai parametrikus oszcillátorral állíthatunk elő. Ebben az eszközben egy 2ω frekvenciájú lézertérrel pumpált nemlineáris kristályban két, ω frekvenciájú módus keletkezik. Ezek féligáteresztő tükrön történő keverése adja a kívánt állapotot, amely ideális esetben minimális bizonytalanságú állapot, azaz a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés egyenlőségként teljesül. Ezen kívül számos más nemlineáris optikai folyamatban is keletkezhet összenyomott fény. Koherens fényből kiindulva összenyomott koherens fényt kaphatunk, amelynek kvantumzaja fázisfüggő. Bizonyos fázispontokban csökken, másutt nő a koherens értékhez képest. Nevezetes eredmény, hogy két koherens állapot kvantummechanikai szuperpozíciója is összenyomott állapotot eredményezhet. Az ilyen állapotot szokás optikai Schrödinger-macska állapotnak is nevezni, hiszen két, makroszkopikusan megkülönböztethető kváziklasszikus állapot szuperpozíciója, amely *Schrödinger* híres paradoxonában is szerepel. A nemklasszikus tulajdonság kialakulásának oka a két állapot közötti kvantuminterferencia. Ez a szuperponált állapotot felépítő egyes állapotok mint valószínűségi amplitúdók között lép fel, ha fizikailag mérhető mennyiséget származtatunk. A különböző állapotokkal számolt operátor-középtértékek az interferenciagörbék. A 2. ábrán a páros Schrödinger-macska állapot, azaz a

$$|\alpha, +\rangle = c(|\alpha\rangle + |-\alpha\rangle) \quad (11)$$

állapot Wigner-függvényét láthatjuk. A 2. ábrán a két Gauss-harang a koherens állapotoknak felel meg, a hullámzó rész a kvantuminterferenciát mutatja.

Növelhetjük az összenyomottságot, ha a vákuumállapotot megfelelő súllyal hozzávesszük a szuperpozícióhoz. Ennek a felismerésnek az általánosítása vezetett el az egydimenziós koherens állapot reprezentációk bevezetéséhez. *Janszky* és *Vinogradov* 1990-ben megmutatta



3. ábra. Összenyomott koherens állapot közelítése $N=9$ koherens állapot szuperpozíciójával a valós tengely mentén, a) az állapot Wigner-függvénye, b) a tüskék a szuperpozíció elemeinek helyzetét és együtthatók abszolút értékét mutatják.

[3], hogy a fázistér valós egyenes mentén Gauss-súlyfüggvénnyel vett folytonos koherens állapot szuperpozíció az összenyomott vákuumállapot:

$$|0, \gamma\rangle = C \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{\gamma}\right) |x\rangle dx. \quad (12)$$

Itt a γ paraméter határozza meg a $|0, \gamma\rangle$ összenyomott vákuumállapot összenyomottságának mértékét, a $|x\rangle$ állapot pedig a fázistér valós tengelyén lévő koherens állapot.

Az ezt követő években számos nemklasszikus állapot egydimenziós koherens állapot reprezentációját sikerült megtalálni [4, 5]. A fotonszámállapotokat és az amplitúdóösszenyomott állapotokat például egy origó középontú körön vett folytonos szuperpozícióval lehet leírni. Szisztematikus eljárás is megadható bármilyen állapot egydimenziós reprezentációjának megtalálására [5]. Ezek a reprezentációk jelentősen leegyszerűsítik a számításokat a Glauber-féle, a teljes komplex síkon, azaz a teljes fázistéren vett reprezentációhoz képest. Segítségükkel az állapotok fizikai jellemzői és viselkedésük optikai folyamatokban egyszerűen elemezhetők. Igazi jelentőségük azonban az, hogy elvezettek annak felismeréséhez, hogy a fény kvantumállapotai igen jó közelítéssel előállíthatók koherens állapotok szuperpozíciójaként [6–8]:

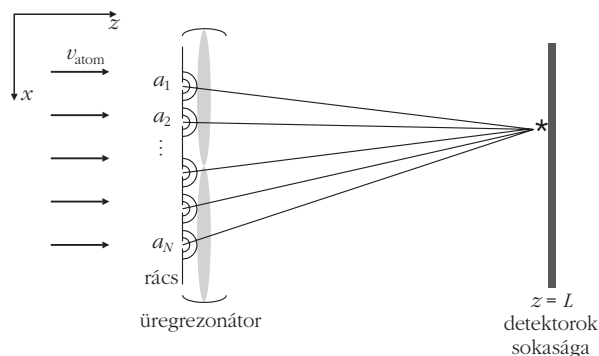
$$|\varphi\rangle = \sum_{i=1}^N c_i |\alpha_i\rangle. \quad (13)$$

A szuperpozíció az állapot egydimenziós reprezentációjának diszkretizálásával származtatható. A c_i együtthatók a reprezentáció kifejtési függvényének értékei az adott α_i pontokban. A vizsgálatok kimutatták, hogy az ekvidiszztans felosztás vezet a legjobb eredményre. A nevezetes állapotok többsége már kisszámú ($N \leq 10$) koherens állapot szuperpozíciójával előállítható [8]. Léteznek olyan diszkrét, koherens állapot-előállítások is, amelyek vákuumhoz közeli, kis amplitúdójú koherens állapotokból építik fel a kívánt állapotot. Példaként a 3. ábrán egy összenyomott koherens állapotot jelenítünk meg vizuálisan. A tüskék a szuperpozíciót alkotó koherens állapotokat reprezentálják. Magasságuk arányos az állapot c_i súlyfaktorának abszolút értékével. A 3.a ábra a létrejött állapot Wigner-függvényét illusztrálja.

Ez az eredmény új lehetőséget nyitott a fény nemklasszikus állapotainak tanulmányozására. Sikerült olyan módszereket kidolgozni, amelyekkel bármilyen szuperpozíció és – egyetlen kísérleti berendezéssel, a paraméterek változtatásával – több nemklasszikus állapot is létrehozható [8, 9]. A 4. ábrán egy ilyen módszer vázlatát láthatjuk. Az elrendezésben egy kétállapotú atom halad át egy rácson és egy rezonátoron, majd a helyét detektáljuk. A rezonátorban lévő elektromágneses tér koherens állapotú, és az atomi átmenettel nem rezonáns. Megmutatható, hogy a detektálás után a rezonátorban $N+1$ koherens állapot körön vett szuperpozíciója alakul ki. A szuperpozíció paramétereit a rések helyzetének, szélességének megfelelő választásával lehet beállítani. A nemklasszikus állapotok koherens állapot szuperpozícióval történő előállítása lehetővé tette általános módszerek kifejlesztését olyan összetett optikai rendszerek tárgyalására, ahol egyszerre több lineáris és nemlineáris folyamat megy végbe [10]. A nemklasszikus állapotok fejlődése, a szuperpozíció együtthatóit ismerve, a levezetett általános összefüggésekkel egyszerűen elemezhető.

Napjainkig a fény számos nemklasszikus állapotát sikerült már laboratóriumokban előállítani, tulajdonságait vizsgálni és különböző kísérletekben használni. Elsősorban az optikai kommunikációban és a nagy pontosságú mérés technikában várható, hogy a gyakorlatban is sikerül a nemklasszikus fényt felhasználni. Sajnos, a nemklasszikus tulajdonságok sérülékenysége nehezíti az alkalmazást. A környezettel történő kölcsönhatás során elkerülhetetlenül fellépő csillapodás, dekoherencia „tönkreteszi” az adott kvantumállapotot. Összenyomott állapo-

4. ábra. Koherens állapot szuperpozíciót előállító módszer vázlat.



tú fény előállítására alkalmas berendezést Magyarországon az MTA SZFKI Lézeralkalmazási Osztályán építettek. Az eszközt fotodetektorok kvantumhatásfokának mérésére használták fel [11]. Jelenleg programozható foton-számú fényforrás fejlesztéséhez alkalmazzák.

Érdemes megemlíteni, hogy a koherens állapotokkal kapcsolatos eredmények más, harmonikus oszcillátor-ként tárgyalható fizikai rendszerekre is kiterjeszthetők. Nevezetes ilyen rendszert alkotnak a csapdázott ionok, amelyekkel szintén számos nemklasszikus rezgési állapot, így Schrödinger-macskák állapot is előállítható.

A bemutatott eredmények legújabb felhasználási területe a kvantuminformatika, amely napjaink kvantummechanikai kutatásának egyik legperspektivikusabb fejezete. E tudományterület tárgya az információátvitel és feldolgozás újszerű, kvantumjelenségeket kihasználó módszereinek kidolgozása. Az alapgondolat a következő: az információ tárolására általában valamilyen fizikai mennyiség értékét használjuk, digitális áramkörökben például egy-egy feszültség szint felel meg az adott bit 0 és 1 logikai értékének. A kvantuminformatikában az információt egy fizikai rendszer állapotában tároljuk. Egy kvantum bit lehet például egy feles spin, állapota pedig a $|0\rangle$ és $|1\rangle$ vektorok tetszőleges szuperpozíciója. Az információfeldolgozás műveleteit a kvantummechanika szabályai határozzák meg.

Ezen az elven számos olyan kommunikációs és számítási feladat elvégezhető, amelyek lehetetlenek hagyományos adatfeldolgozó eszközökkel. Például ma már lehet-

séges olyan titkosított optikai kommunikációs csatorna létrehozása, amelynek feltörhetetlenségét a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés garantálja. A kvantuminformatika egyik fontos fejezete a folytonos változós kvantuminformatika, ahol az információt fénymódusok nemklasszikus állapotaiba kódolják [12]. A koherens állapotok ebben alapvető szerepet játszanak, a szuperpozíciókkal való leírás pedig hasznos technikának bizonyult a kapcsolódó jelenségek leírásában [13, 14].

Irodalom

1. R.J. GLAUBER – Phys. Rev. Letters *10* (1963) 84
2. R.J. GLAUBER – Phys. Rev. *130* (1963) 2529 és *131* (1963) 2766
3. J. JANSZKY, A.V. VINOGRADOV – Phys. Rev. Lett. *64* (1990) 2771
4. P. ADAM, J. JANSZKY, A.V. VINOGRADOV – Opt. Commun. *80* (1990) 155 és Phys. Lett. A *160* (1991) 506
5. P. ADAM, I. FOLDESI, J. JANSZKY – Phys. Rev. A *49* (1994) 1281
6. J. JANSZKY, P. DOMOKOS, S. SZABO, P. ADAM – Phys. Rev. A *51* (1995) 4191
7. P. ADAM, S. SZABO, J. JANSZKY – Phys. Lett. A *215* (1996) 229
8. S. SZABO, P. ADAM, J. JANSZKY, P. DOMOKOS – Phys. Rev. A *53* (1996) 2698
9. P. DOMOKOS, J. JANSZKY, P. ADAM – Phys. Rev. A *50* (1994) 3340
10. A. KARPATI, P. ADAM, J. JANSZKY, M. BERTOLOTI, C. SIBILIA – J. Opt. B-Quantum Semicl. Opt. *2* (2000) 133
11. A. CZITROVSKY, A. SERGIENKO, P. JANI, A. NAGY – Metrologia *3* (2000) 617
12. Z. KURUCZ, P. ADAM, Z. KIS, J. JANSZKY – Phys. Rev. A *72* (2005) 052315
13. J. JANSZKY, M. KONIORCZYK, A. GÁBRIS – Phys. Rev. A *64* (2001) 034302
14. J.K. ASBOTH, P. ADAM, M. KONIORCZYK, J. JANSZKY – Eur. Phys. J. D *30* (2004) 403

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK ELHELYEZÉSE

Ormai Péter

Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kht., Budaörs

Életünk szerves részét képezik azok az orvosi, ipari, mezőgazdasági és kutatási tevékenységek, amelyek során radioaktív anyagokat használnak fel, és melyek végül radioaktív hulladék keletkezésével járnak. A nukleáris alapon termelt villamos energia természetes velejárája az elhasznált (kiégett) fűtőelem, és a folyamat során keletkező – különböző aktivitású – radioaktív hulladékok, melyeket kis, közepes és nagy aktivitású kategóriába sorolnak.

A kis aktivitású hulladékok közé azok az anyagok tartoznak, amelyek radioaktivitása csak kis mértékű ($A < 5 \cdot 10^4$ Bq/kg), ezért kezelésük csak minimális sugárvédelmi óvintézkedéseket igényel. A közepes aktivitású hulladékok radioaktív anyag tartalma nagyobb ($5 \cdot 10^4$ Bq/kg $< A < 5 \cdot 10^8$ Bq/kg), ezért kezelésük során fokozottabb elővigyázatossággal kell eljárni. A szükséges sugárvédelem kellő árnyékolással (pl. betonkonténer, betonfal), vagy a munkavégzés idejének korlátozásával megfelelően biztosítható. A nagy aktivitású hulladékok aktivitása ezzel szemben olyan nagy, hogy annak következtében jelentős a hő kibocsátás. Ebbe a kategóriába tartoznak az elhasz-

nált fűtőelemek, illetve az azok feldolgozásából származó, jellemzően üvegbe ágyazott melléktermékek.

Egy 1000 MW_(e)-os atomerőműből évente 35 tonna kiégett fűtőelem kerül ki. Abban az esetben, ha ezt újra feldolgozzák, mindössze 3 m³ nagy aktivitású hulladék marad vissza. A teljes nukleáris fűtőanyagciklus – az uránbányászattól az üzemeltetésen át – évente körülbelül 500 m³ kis és 200 m³ közepes aktivitású radioaktív hulladékot eredményez a fenti teljesítményű atomerőmű esetén. Egy korszerű 1000 MW_(e) teljesítményű széntüzelésű erőmű évente 900 t SO₂-t, 4500 t NO_x-t, 1300 t port és 6,5 millió t CO₂-t bocsát ki, és – a szén minőségétől függően – 1000000 t toxikus nehézfémeket és radioaktív anyagokat tartalmazó hamut hagy hátra. A radioaktív hulladékokban lévő radioizotópok mennyisége jól meghatározott felezési idővel bomlik, így a radioaktivitás, és ezen keresztül az általa képviselt veszély is időben csökken, majd megszűnik.

Jóllehet a nukleáris energia egyedülállóan tiszta energiaforrás, vele kapcsolatosan mégis – leginkább a radioaktív hulladékok végleges elhelyezését firtató – aggodalmak fogalmazódnak meg.

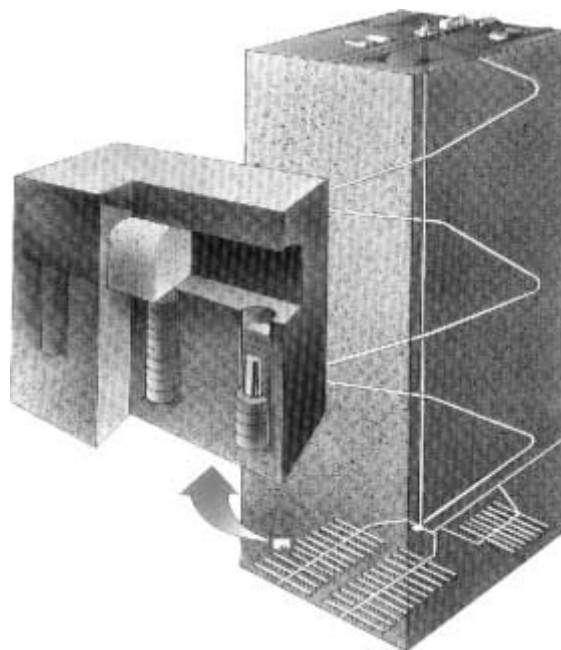
Kis és közepes aktivitású hulladék elhelyezése

Majd fél évszázaddal ezelőtt merült fel az a koncepció, hogy a radioaktív hulladékokat földfelszín közeli vagy felszín alatti tárolókba helyezve szigeteljük el az emberi környezettől. Az ötvenes években a hulladékok védelem nélküli, földmedrű lerakása volt a jellemző, amelynek során a természetes környezetet úgy igyekeztek megválasztani, hogy a hulladékok aktivitástartalmának gyors hígulását vagy hosszabb idejű „helyben maradását” biztosítsák. A sugárvédelemben és a tudatos környezetvédelemben a hatvanas években bekövetkezett fejlődés az addigi gyakorlatot nem igazolta. A megfelelő mértékű izoláció iránti igény kielégítésére született meg az a koncepció, hogy az izolációt három tényező együttes hatásának – a hulladékformának és csomagolásnak, a kialakított műszaki védelmeknek és a geológiai befogadónak – kell szavatolnia. A nyolcvanas évek elejére kidolgozott koncepciók már figyelembe vették a *hulladékok élettartamát* is, és meghatározták a rövid, illetve hosszú élettartamú hulladékok kategóriáját, amelyek között a 30 éves felezési idejű izotópok domináns jelenléte lett a választóvonal. A jelenleg elfogadott biztonsági filozófia alapján felszíni vagy felszín közeli elhelyezésre csak azok a rövid felezési idejű hulladékok alkalmasak, amelyekben a hosszú felezési idejű izotópok koncentrációja nem haladja meg a 400–4000 kBq/kg értéket. Minden egyéb hulladékfajtának geológiai elhelyezésre kell kerülnie.

Ugyancsak a nyolcvanas években vált általánossá – a hulladéktárolók engedélyezésekor – a lakossági meghallgatás intézménye, elsősorban a félelmek tisztázására. Erre az időszakra tehető a biztonsági és sugárvédelmi kérdések kockázati alapú megközelítése, mely egyrészt módszertani fejlesztési igényeket támasztott, másrészt kockázati kritériumok alkalmazását tette szükségessé, harmadrészt a kapcsolódó tevékenységek (telephely-kiválasztás, intézményes ellenőrzés) tartalmát és jellegét változtatta meg. Egyre hangsúlyosabban fogalmazódtak meg a hulladék elhelyezés alapelvei, az emberi egészség és a környezet védelme, illetve a jövő nemzedék iránti felelősség.

A radioaktív hulladékok elhelyezésével kapcsolatos viták súlypontja a műszaki tudományok területéről fokozatosan a társadalmi-politikai területre tevődött át. Szakmai körökben teljesnek mondható az egyetértés, hogy a kis és közepes aktivitású hulladékok biztonságos elhelyezése műszaki és tudományos szempontból a tökéletesen megoldható problémák közé tartozik – még akkor is, ha azt a lakosság nem mindig fogadja el. Ma már a világban nemcsak üzemelő tárolók léteznek – több mint 100 –, hanem, megteltüket követően, bezárt telephelyek is. A hulladék elhelyezéssel kapcsolatos – elsősorban politikai és társadalmi indíttatású – viták a fejlett országokban nem a kis és közepes aktivitású hulladékok, hanem a nagy aktivitású és hosszú élettartamú radioaktív hulladékok nagyon távoli jövőre prognosztizált viselkedésének megítélése körül folynak.

A felszín alatti, azaz geológiai tárolók esetében különösen fontos a telephely körülmények kiválasztása, mivel



1. ábra. A svéd (Forsmark) hulladéktároló elrendezési vázlata

ennek jellemzői rendkívüli mértékben befolyásolják a tároló hosszú távú biztonságát. Az elmúlt évtizedben jelentős előrelépés történt a *biztonsági értékelés technikájának* javításában, a telephelyek jellemzésének módszertanában, valamint a tervezés és a biztonsági értékelés integrálása területén. A koncepcionális és a műszaki kérdéseken túl egyre nagyobb hangsúlyt kap a bizalomépítés és társadalmi párbeszéd. Mivel a tároló tervezése, műszaki fejlesztése, az ezzel járó kutatás, a telephely kiválasztása, az építés és végül az engedélyezés hosszú évekig is elhúzódhat, nagyon lényeges a *fokozatos megközelítés*.

A kis és közepes aktivitású hulladékok tárolási telephelyének kiválasztására nincs egyedüli, kizárólagos stratégia. Több országban kiindulásként nagyszámú potenciális területet azonosítottak, majd a szóba jöhető telephelyek listáját további területminősítési szempontok és egyéb megfontolások alapján fokozatosan szűkítették. Máshol „önként jelentkező” önkormányzatokat kerestek a potenciális telephelyek lehetséges listájának összeállításához.

A jelenleg működő felszíni hulladéktárolók közül a francia (L'Aube), a spanyol (El Cabril) és a japán (Rokkasho) tekinthető a legkorszerűbbnek, míg a felszín alattiak közül a gránitban létesített két finn (Loviisa és Olkiluoto) és a svéd (Forsmark) tároló. Az utóbbit kristályos metamorf kőzetben, 60 m mélységben a Balti-tenger alatt építették meg (1. ábra). Ezt a létesítményt 1988-ban hozták létre. Itt helyezik el az atomerőművek üzemeltetéséből származó összes rövid élettartamú, kis és közepes aktivitású, illetve az orvosi, az ipari és a kutatási alkalmazásokból eredő radioaktív hulladékot. A számítások szerint 500 év múlva a hulladék megmaradó aktivitása a befogadó kőzet természetes háttérsugárzása szintjére csökken. A tárolóban négy kamrát és egy silót alakítottak ki a különböző típusú hulladékok elhelyezésére. A tárolótérhez a külszínről két alagút vezet. A közepes aktivitású hulladékokat – elsősorban a reaktor vizének tisztítására

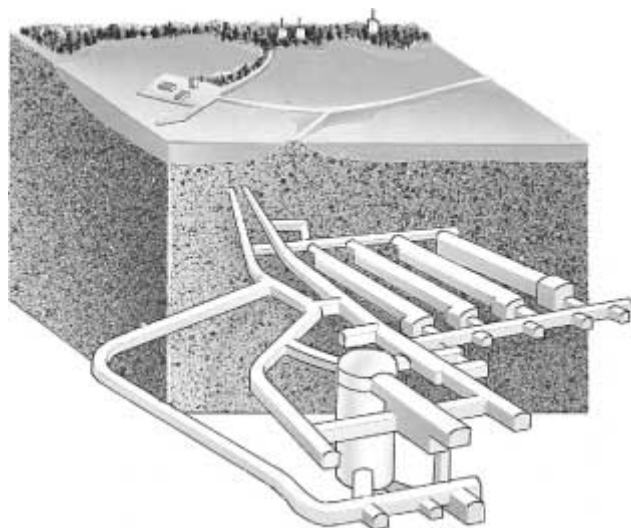
használt és a tárolóba történő szállítást megelőzően megszilárdított szűrőgyantákat – 25 m átmérőjű és 50 m magas betonsilóban helyezik el, melyet egy hengeres sziklakamrában alakítottak ki. A siló és a kőzet közti teret bentonitos agyaggal töltötték ki, amely szigetelőként funkcionál a vízáramlással szemben. A silón belül a hulladékot függőleges aknában helyezik el, melyeket utólag betonnal töltenek ki. A kisebb védelmet igénylő alacsonyabb aktivitású hulladékokat 160 m hosszú sziklakamrákban helyezik el. A tároló jelenlegi kapacitása 60 000 m³. További 30 000 m³ kapacitást alakítanak ki majd a második fázisban, a harmadik szakaszban pedig a leszerelési hulladék elhelyezéséhez szükséges további 100 000 m³ tárolóteret építik ki.

Több ország tervezi – Franciaország pedig már meg is valósította – hogy a *nagyon kis aktivitású* hulladékokat külön tárolóban helyezi el. A közeljövőben egyre nagyobb számban leszerelésre kerülő atomerőművek hulladékkezelési stratégiájának fontos eleme lehet ez a megoldás. Ezen hulladékok aktivitástartalma ugyan magasabb, mint a „közönséges hulladék”-ká nyilvánítás határértéke, az úgynevezett felszabadítási szint, ám ezek nem igényelnek olyan robusztus mérnöki megoldásokat, mint általában a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése. Mivel az atomerőművek leszereléséből igen nagy mennyiségben keletkezik ilyen nagyon kis aktivitású hulladék, jelentős költségmegtakarítás érhető el ezek szeparált elhelyezésével.

Nagy aktivitású, hosszú életű hulladékok

A nukleáris energiatermelésből eddig keletkezett kiégett fűtőelemek mennyisége körülbelül 250 000 t nehézfém. Az előrejelzések szerint 2010-re ez az érték eléri a 300 000 t-t, ebből több, mint 2000 t lesz a plutónium. A jelenleg tárolt kiégett fűtőelemek mennyisége körülbelül 20-szorosra a ma rendelkezésre álló újrafeldolgozási kapacitásnak. Figyelembe véve, hogy nagy aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezése 2010 előtt egyetlen ország-

2. ábra. A nagy aktivitású hulladék mélygeológiai elhelyezésének svéd koncepciója



ban sem várható, a következő években minden felhasználónak a hosszú idejű átmeneti tárolásra kell berendezkednie.

A kiégett nukleáris fűtőelemek teljes körű kezelésének jelenleg négy stratégiája létezik. A *nyílt üzemanyagciklus* során a kiégett fűtőelemeket feldolgozás nélkül (de megfelelően előkészítve) véglegesen elhelyezik egy erre a célra kialakított mélygeológiai tárolóban. A *zárt üzemanyagciklus* stratégiája szerint a kiégett nukleáris üzemanyag hasadóképes komponenseit (az uránt és a plutóniumot), nyersanyagként újra felhasználják fűtőanyag gyártásához. Ehhez az elhasznált fűtőelemeket kémiailag fel kell dolgozni, idegen szóval reprocessálni kell. Ez után is maradnak vissza nagy aktivitású, hosszú élettartamú hulladékok, ezeket üvegbe ágyazzák, majd pedig véglegesen elhelyezik geológiai tárolóban. A *továbbfejlesztett zárt üzemanyagciklus* néven ismert stratégia szerint a kiégett fűtőanyagot újra feldolgozzák, és a keletkező termékeket szétválasztási és átalakítási (transzmutációs) eljárásnak vetik alá, melynek során a nagyon hosszú élettartamú komponenseket (a transzurán elemeket) rövidebb életűvé alakítják át. Ezáltal a hulladékok izolálásához szükséges idő jelentősen csökkenthető. A transzmutáció megvalósításához azonban olyan drága nagyberendezések (pl. protongyorsító) kellene, amelyeket csak a legfejlettebb országok tudnak megépíteni. A fejlesztés hosszú évtizedekig is eltarthat, és még sikeres megvalósítás esetén is szükség lesz a maradék anyagok végleges elhelyezését lehetővé tevő mélygeológiai tárolókra. A negyedik lehetséges cselekvési irány, a *késleltetés stratégiája* szerint a kiégett fűtőelemeket átmeneti tárolóban helyezik el, ahol a tárolás, elméletileg, meghatározatlan ideig fenntartható megfelelő ellenőrzéssel és karbantartással, de ez az elképzelés semmiképpen nem tekinthető végleges megoldásnak.

Az elmúlt évtizedekben a szakemberek számos lehetőséget tanulmányoztak a nagy aktivitású hulladékok bioszféra-tól történő hosszú idejű tartós elszigetelésére. A tengerbe süllyesztés, a mélytengeri óceáni talapzatban való elhelyezés, vagy a kontinentális jégsapka alá való hulladéklerakás egyrészt nemzetközi egyezményeket sértene, másrészt nagyon kockázatos, mivel a hulladékok az elhelyezést követően ellenőrizhetetlenül válnak. Az ürbe való kilövés rendkívül drága, és fennáll a visszahullás lehetősége. Mára már széles körű nemzetközi egyetértés alakult ki a hosszú élettartamú radioaktív hulladékok stabil mélygeológiai formációkban való elhelyezésének műszaki előnyeiről. A természetes és műszaki gátak biztosította rendszer révén ez a stratégia megteremti annak lehetőségét, hogy a hulladékokat rendkívül hosszú időre elzárják a bioszféra-tól, illetve, hogy a radioaktív izotópok csak elhanyagolható koncentrációban jelenhessenek meg az emberi környezetben. Ezzel a megoldással a véletlen emberi behatolásból származó kockázat is minimálisra tehető. Ez a végleges elhelyezési megoldás lényegében egy passzív védelem, mely nem igényel további beavatkozást vagy intézményes ellenőrzést. Ez az opció meghagyja a jövő nemzedékeknek azt a lehetőséget, hogy, ha akarják, visszatermeljék a hulladékot. A 2. ábra a mélygeológiai elhelyezés svéd koncepcióját mutatja.

A kiégett fűtőelemek maradék-radioaktivitása – annak biológiai hatása (radiotoxicitása) – a reaktorból való kikapást követően jelentősen csökken, ám közvetlenül végleges geológiai tárolóba helyezésük esetén még nagyon hosszú ideig kell biztosítani a bioszférától való hatékony izolációt. Jó néhány geológiai képződmény több tízmillió éve meglevő stabilitását ismerve a hosszú idejű geológiai elzárás reális célkitűzés. A geológiai elhelyezéshez szükséges tudományos ismeretekben és a technológiában jelentős előrehaladás történt. A tároló létesítési és üzemeltetési technológiája kellően kiforrott ahhoz, hogy a gyakorlatban bevezethető legyen, amint a társadalmi és politikai feltételek ezt lehetővé teszik.

Hulladéktároló mélygeológiai formációba történő telepítésének első lépése a potenciális befogadó átfogó vizsgálata. Ennek leghatékonyabb módszere a mélybeli kőzetkörnyezet helyszíni (in-situ) vizsgálata föld alatti kutatólaboratóriumokban. Ezeket a kutatásokat egyre inkább nemzetközi összefogásban végzik. A kutatólaboratórium rendeltetése a földtani környezet és azon belül a befogadó kőzet részletes megismerése, a földtani és műszaki gátrendszer kölcsönhatásainak vizsgálata, a végleges elhelyezés műszaki megoldásainak optimalizálása és mindezek bemutatása a nyilvánosság számára. Néhány országban (USA, Svédország, Finnország) a mélygeológiai tárolóépítésre vonatkozó döntés közelébe jutottak, ám a legtöbb ország még évtizedekre van a létesítéstől.

Általános vélemény szerint a legnagyobb kihívás a szakemberek számára az, hogy a geológiai elhelyezésbe vetett bizalmat közvetíteni tudják a széles társadalomnak.

A magyarországi helyzet

A Paksi Atomerőműben évente mintegy 400 darab kiégett fűtőelem-kazetta képződik, ami 46,5 tonna nehézfémnek felel meg. A műszaki tervek kidolgozásakor elfogadott koncepció szerint a kiégett üzemanyag-kazettákat, az erőmű pihentető medencéjében eltöltött 3 éves hűtési időtartam után, a Szovjetunió – reprocessálásra – visszavette azzal, hogy az összes feldolgozási végtermék ott maradt. 1989 és 1998 között 2331 db kiégett kazettát szállítottak vissza a volt Szovjetunióba.

Jelenleg a pihentető medencékből eltávolított fűtőanyagkötegeket vasúton átszállítják az atomerőmű közvetlen szomszédságában lévő „Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolójá”-ba (KKÁT). A tároló földfelszíni épület, amelyben a fűtőanyag-kazettákat egyenként, függőleges helyzetű, vastag falú, hermetikusan zárt acélcsövekben helyezik el, ez utóbbiakat azután nitrogéngázzal töltik fel (3. ábra). A csövek betonfalakkal körülvett kamrákban állnak. A kiégett kazetták maradék hőtermelése miatt szükséges hűtést a tárolócsövek közötti természetes légáramlás biztosítja. Az elhasznált fűtőanyagkötegek ebben a létesítményben 50 évig tárolhatók. A KKÁT modulrendszerű, szükség szerint bővíthető. Minden egyes kamramodulja 450 kiégett fűtőanyagköteg befogadására alkalmas. 2006 elején a tárolt mennyiség 3767 darab volt. A KKÁT, bővíthetőségének köszönhetően, az erőmű élet-



3. ábra. Kiégett fűtőelemek átmeneti tárolója Pakson

tartama alatt keletkező valamennyi kiégett üzemanyagköteg befogadására képes lesz.

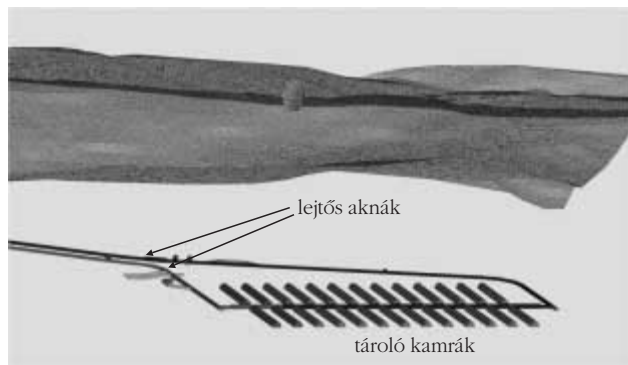
1994-ben kezdődtek kutatások a mecseki uránbánya vágataiból kiindulva a bodai aleurolitnak nevezett agyagkő-formációban (BAF) annak megállapítására, hogy alkalmas-e ez a kőzet a nagy aktivitású és hosszú élettartamú hulladékok elhelyezésére. Az 1998-ban lezárult program biztató eredményei alapján a további kutatások céljából egy mélységi laboratórium létrehozására született javaslat, ez azonban az uránbánya bezárásáról hozott kormánydöntés miatt nem valósult meg.

2004-ben a nagy aktivitású és hosszú élettartamú hulladékok végleges elhelyezésére szolgáló létesítmény telephelyének behatárolását célzó kutatások immár jóváhagyott terv alapján, ugyan források szűkében visszafogottan, de megkezdődtek. A kutatási terv szerint a Nyugat-Mecsekben található agyagkőben elsőként ki kell jelölni, majd meg kell valósítani azt a mélygeológiai kutatólaboratóriumot, amelynek bázisán megkezdődhetnek a tároló létrehozását megelőzően szükséges, több évet igénylő kutatások. A tároló megvalósításának céldátuma 2047.

A püspökszilágyi telephelyen 1976-ban kezdte meg működését a Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló (RHFT) a gyógyászatból, kutatásból, oktatásból és ipari alkalmazásokból származó radioaktív hulladékok elhelyezésére. Az atomerőművi szilárd, kis aktivitású radioaktív hulladékok egy részének elhelyezésére 1990–91-

4. ábra. Az intézményi radioaktív hulladékok végleges tárolója Püspökszilágyban



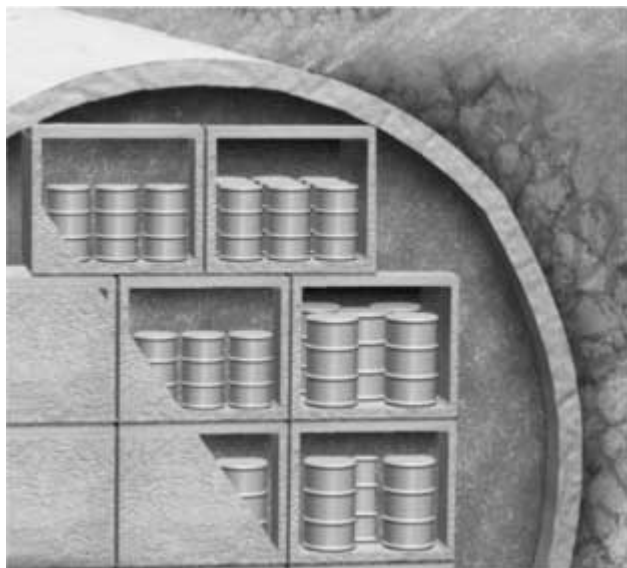


5. ábra. A Bataapátiba tervezett kis és közepes aktivitású hulladéktároló elvi elrendezése

ben a tároló kapacitását 3500 m³-ről 5000 m³-re bővítették. 1998 végén az RHFT szabad tárolási kapacitása 170 m³-re szűkült, de ez a következő években még biztosítja a nem atomerőművi eredetű évi mintegy 10–20 m³ radioaktív hulladék elhelyezését (4. ábra). Jelenleg a telephely fejlesztése folyik azzal a céllal, hogy a tároló még évtizedekig képes legyen feladatát ellátni.

Az atomerőmű üzemeltetése következtében a tervezett 30 éves üzemidő végéig körülbelül 13000 m³ kis és közepes aktivitású hulladék keletkezik. Ehhez adódik a leszerelési hulladék 17000 m³ mennyisége, ezért összességében 30000 m³ bruttó tárolótér kialakítására kell felkészülni. Magyarországon 1993 óta folyik az atomerőműből származó kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére szolgáló tároló telephelyének kutatása. Először egész Magyarország területét, második lépésként egyes kiválasztott területeket vontak a szakirodalmi, adattári vizsgálatok körébe. Csak mintegy tucatnyi geológiai objektum kapta meg a szükséges társadalmi támogatást a több száz lehetséges célterületből. Négy perspektivikus területet vizsgáltak meg terepi kutatással. A vizsgálatok alapján a Bataapáti közeli gránit bizonyult a legalkalmasabbnak. Az Országgyűlés 2005 novemberében elfogadta a tároló létesítését előkészítő tevékenység megkezdésé-

6. ábra. A Bataapáti-i tároló belső terének elrendezése



hez szükséges előzetes, elvi hozzájárulásról szóló határozatot azt követően, hogy Bataapáti lakosai, 90%-os támogatási arányban, beleegyeztek abba, hogy lakóhelyük közelében tároló épüljön.

A végső kutatási fázis gerincét két párhuzamos lejtakna kialakítása, és az innen lefolytatott vizsgálatok jelentik (5. és 6. ábra). A tárolóra vonatkozó előzetes környezeti hatástanulmány nemrégiben elkészült, így a tároló engedélyeztetésének első lépése megtehető. Amennyiben a szükséges erőforrások rendelkezésre állnak, akkor a tároló legkorábban 2008 végén fogadni tudja az első szállítmányt a paksi atomerőműből.

Záró gondolatok

A radioaktív hulladékok végső elhelyezése jelenleg létező probléma, és valószínűleg a jövőben is az marad, amíg csak az emberi civilizáció létezik még akkor is, ha a technológiai fejlődés átvezeti az emberiséget a fúziós korszakba. Annak ellenére jelentős a félelem és az ellenérzés a témával kapcsolatban, hogy nem ez az a kérdés, amely miatt az emberiségnek hosszú távon leginkább aggódnia kellene. A radioaktív hulladékok végleges elhelyezése nem olyan feladat, amelyet egyszer s mindenkorra meg lehet oldani, hanem inkább egy hosszú problémásor megoldásának kezdete, amely átnyúlik legalábbis a következő évszázadokba. A feladat természeténél fogva nem oldható meg egyszerre úgy, hogy többé ne merüljön fel.

Nem képzelhető el az atomenergia, a nukleáris medicina és a nukleáris ipar más ágazatai által nyújtott előnyök igénybevétele anélkül, hogy ne oldanánk meg a hulladékok végleges elhelyezésének kérdését. Azt is tudomásul kell venni, hogy mára már jelentős mennyiségű nukleáris hulladék halmozódott fel a világban. A jelenleg meglévő, illetve a rövid és középtávon keletkező hulladékmennyiség a korábban meghozott döntések következménye. Ma már túl késő úgy határozni, hogy kevesebb, vagy akár semennyi hulladékunk ne legyen. Következésképpen előbb-utóbb gondoskodni kell a radioaktív hulladékok biztonságos tárolásáról és elhelyezéséről.

Általánosan elfogadott nézet, hogy a hosszú távú hulladékkezelésnek *etikai, társadalmi és politikai* dimenziói vannak. A hosszú távú kezelési stratégiák elfogadását, így a geológiai tárolót is, csak társadalmi és kormányzati szinten lehet elérni, az érdekelt szervezetekkel való konzultációk után, a közvélemény tekintetbe vételével. A geológiai tárolók létesítéséig elvezető hosszú, lépésenkénti folyamat időt és alkalmat hagy a társadalmi támogatás bázisának szélesítésére, és az egyéb alternatívák kiértékelésére.

Nemzetközi szinten egyre inkább tudatossá válnak a hulladékkezelés szélesebb összefüggései. A nemzetközi testületekben és azokon kívül zajló viták nyilvánvalóvá tették, hogy figyelmet kell szentelni olyan kérdéseknek is, mint a *fenntarthatóság*, amely az energiatermelés és -felhasználás, valamint a hulladékkezelés és -kezelés komplex vizsgálatát teszi szükségessé.

A kvarkanyag egy erősen kölcsönható plazma. Ha ideális gázként közelítjük, akkor az ezt a gázt alkotó részecskéknek nem határozott, hanem elkent, elosztott tömegük van. Ezen tömegeloszlás a kvarkanyag nyomás–hőmérséklet görbéjéből rekonstruálható: az eredmény jelentősen eltér a szabad kvarkok vagy gluonok tömegétől. Ez a jelenség összefügg a kvarkbezárással.

A kvarkanyag kvázirészecske modellje

Az Univerzum korai, forró őskorának egy szakaszán a világot kvarkanyag, forró kvark–gluon plazma töltötte ki. Hasonló anyag ma már csak gyorsító kísérletekben, ott is csak nagyon rövid időre hozható létre. Szétrobbanása során rengeteg új hadron, a magerőkre érzékeny elemi részecske keletkezik, főleg pionok, de más, egzotikus részecskék is. A kirepülő részecskék spektruma mint egy hűlő mini-világegyetem, kívülről nézve kékeltoledást szenved. A távoli galaxisok vöröseltolódása az Ősrobbanást belülről szemlélteti, a kékeltoledás a felénk közeledő részecskék esetén lép fel. Ebből a spektrumból, a robbanás hevességéből igyekszünk következtetni a forró kvarkanyagban uralkodó nyomásra és hőmérsékletre, energiasűrűsége, röviden a kvarkanyag állapotegyenletére.

A kísérletek és a műszeres megfigyelés mellett elméleti számítások segítik a kutató fizikusokat annak megértésében, amit „látnak”. A kvarkok és gluonok, a kvarkanyag alkotóelemei között ható erők (illetve az azt leíró kvantum-kromodinamika, a QCD) ismeretében elvileg meghatározható az állapotegyenlet, s ezúton megjósolható a robbanás milyensége, kiszámítható a spektrum. Az einsteini $E = mc^2$ képlet alapján energiából (nyugalmi) tömeg keletkezik, ezt hordozzák az atommag-ütközésenként ezrével keletkező hadronok.

A kvarkanyag állapotegyenlete tehát az egyik alapvető kölcsönhatás, s ezzel világunk keletkezése megértésének a kulcsa. Mégis jelenleg több, egymással versengő elméleti számolás létezik, mert a QCD alapegyenleteiből eljutni a robbanás leírásáig és a spektrum kiszámításáig nagyon bonyolult elméleti feladat. Kénytelenek vagyunk közelítő feltevésekkel és a QCD helyett leegyszerűsített modellekkel is dolgozni. A hátrányból előnyt kovácsolva azt mondhatjuk, hogy a különböző úton kidolgozott eredmények összevetéséből tanulhatunk valami újat a kvarkanyagról.

A kvarkanyagról már a kutatások elején (a hetvenes évek közepén) kialakult az az elképzelés, hogy ez egy plazma: viszonylag szabadon mozgó töltések összességében semleges felhője, amely sűrű és forró, majd extrém gyorsan kitérül és lehűl. Viszonylag újkeletű az a felismerés, vagy még inkább ennek fokozatos tudomásulvétele, hogy a kvarkanyag egy erősen kölcsönható, erősen

csatolt plazma. Ez – többek közt – azt jelenti, hogy a kollektív gerjesztések (a plazmonok), általános kifejezéssel kvázirészecskék, szerepe dominál a plazmát alkotó elemi részecskék felett: mintha a plazma egészen másból állna, mint ami valójában alkotja.

A leegyszerűsítő elméleti modellek közül a legsikeresebb a kvázirészecske modell. Ez a modell a QCD alapegyenleteiből kiinduló hosszadalmas és terjedelmes számítógépes rácsmodellszámítások eredményeit, amelyek az erősen csatolt plazmát írják le, egymással nem vagy csak alig kölcsönható ismeretlen részecskék, kvázirészecskék ideális gázként kezeli. Az érdekes az, hogy a nyomás–hőmérséklet görbe, ami ebben az esetben a termodinamikai leírás alapja, illeszthető ezzel a feltevéssel. Persze nincs „szabad a vásár”, cserébe a részecske tulajdonságai lesznek bonyolultak. Olyannyira, hogy még részecskeszerűségük, például a megszokott fix nyugalmi tömeg, is feloldódik egy általánosabb energia–impulzus összefüggés (szaknyelven diszperziós reláció) keretei között.

A kvarkanyag állapotegyenlete

A termodinamikai állapotegyenletet nagy térfogatú, homogén anyagokra, így az elképzelt kvarkanyagra is, a nyomás és az abszolút hőmérséklet összefüggése adja meg. Ebből más fontos termikus jellemzők, mint az átlagos energiasűrűség vagy az entrópia levezethetők. A nyomás tanulmányozása a kulcsa a lehetséges fázisátalakulások felderítésének is.

A kvázirészecske modellben a kvarkanyag nyomása az adott tömegű relativisztikus részecskék gázának nyomásából származtatható. Bizonyos változatokban maga ez a tömeg is a hőmérséklet függvénye, sőt a részecskék energiájának értéke adott mozgásmennyiség mellett nem feltétlenül követi az

$$E = \sqrt{\mathbf{p}^2 + m^2} \quad (1)$$

képletet¹, hanem egy szigorúan éles érték helyett eloszlása van. Kollégáimmal, *Zimányi Józseffel*, *Lévai Péterrel* és *Ván Péterrel* azt az elképzelést vizsgáltuk, amikor az m tömeg folytonos eloszlású. A kvarkanyag nyomását ekkor egy integrál (folytonos összeg),

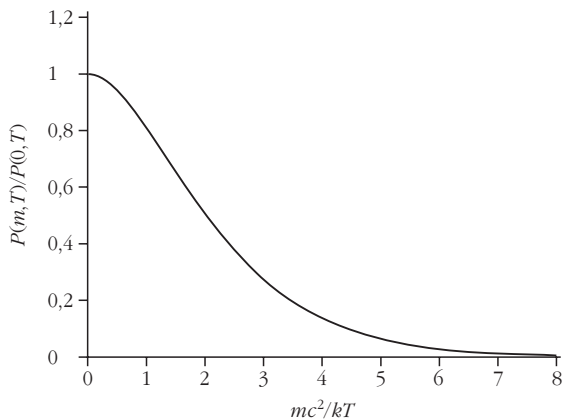
$$P(T) = \int w(m) P(m, T) dm \quad (2)$$

adja meg, ahol $w(m)$ a tömegeloszlás, $P(m, T)$ az adott m tömegű relativisztikus részecskékből álló ideális gáz nyomása.

Ez utóbbi a részecskék kinetikus energiájával függ össze, relativisztikus esetben a következő, az összes lehetséges impulzusra vett integrál adja meg:

A Jávorkúti Magyar Magfizikus találkozón 2006. május 5-én elhangzott előadás nyomán.

¹ Ebben a cikkben a $c = 1$, $k = 1$ és $\hbar = 1$ részecskefizikai egységrendszert használjuk, ezért például $m/T = mc^2/kT$.



1. ábra. A tömeges részecskegáz nyomása osztva a tömegtelenével az m^2/kT arány függvényében. Ez egyben a tömegeloszlás és az össznyomás közötti integráltranszformáció magfüggvénye is.

$$P(m, T) = \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \frac{p^2}{3E} e^{-E/T}, \quad (3)$$

ahol E az (1) képlet szerint függ a \mathbf{p} impulzustól és az m tömegtől. Mivel a kvarkanyagban izotrópiát tételezünk fel, csak az impulzus nagysága, p marad integrációs változó:

$$P(m, T) = \frac{1}{6\pi^2} \int_0^\infty p^2 \frac{p^2}{E} e^{-E/T} dp. \quad (4)$$

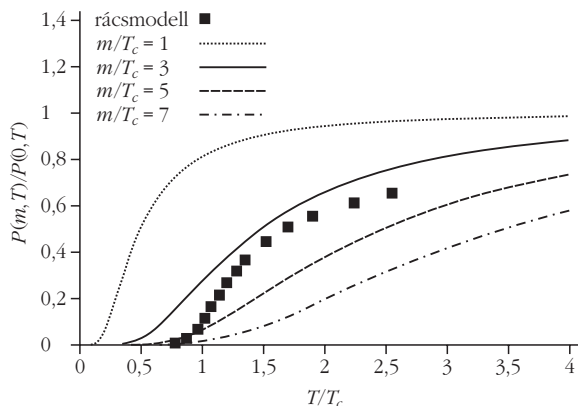
Ez az integrál a lehetséges energiákra vett integrállá alakítható az (1) képlet négyzetének a differenciálásával: $E dE = p dp$. Az eredmény,

$$P(m, T) = \frac{1}{6\pi^2} \int_m^\infty (E^2 - m^2)^{3/2} e^{-E/T} dE. \quad (5)$$

Ez a képlet a zérus nyugalmi tömegű részecskék gázának – mint amilyen például a tiszta sugárzást leíró fotongáz – nyomását adja az $m = 0$ speciális esetben:

$$P(0, T) = \frac{1}{6\pi^2} \int_0^\infty E^3 e^{-E/T} dE = \frac{1}{\pi^2} T^4. \quad (6)$$

2. ábra. A tömeges részecskegáz nyomása osztva a tömegtelenével különböző m/T_c (m^2/kT_c) arányokra. A QCD-t megoldó rácsmódszámolás eredményét fekete négyzetek jelzik. A jellemző energiaegység $kT_c = 165$ MeV.



A tömeges relativisztikus ideális gáz ezen standard nyomással leosztott értéke már csak az m/T függvénye, ez az $x = E/T$ és $s = m/T$ változók bevezetésével jól látható:

$$\frac{P(m, T)}{P(0, T)} = \Phi(s) = \frac{1}{6} \int_s^\infty (x^2 - s^2)^{3/2} e^{-x} dx. \quad (7)$$

Ez az eredmény kifejezhető egy ismert függvény, a képzetes argumentumú Bessel-függvény (McDonald-függvény) segítségével:

$$\Phi(s) = \frac{1}{2} s^2 K_2(s).$$

A függvény lefutását az 1. ábra mutatja.

A 2. ábrán a különböző tömegű relativisztikus gázok nyomását hasonlítjuk össze a QCD rácsmódszámolás által kiszámított nyomással². Látható hogy egyrészt a QCD nyomásgörbe messze esik a tiszta sugárzás nyomását jellemző egyenestől, másrészt nem követi semmilyen adott állandó tömegű részecskékből álló gázét sem. A jellemző energiáskála a QCD-ben a nyomás hirtelen csökkenését okozó hőmérsékletnek, T_c -nek megfelelő energia: $kT_c \approx 165$ MeV³. A jellemző tömegek valahol $m = 3kT_c/c^2$ és $m = 7kT_c/c^2$ között lehetnek: sem a túl könnyű, sem a túl nehéz kvázirészecskék nem járulnak hozzá jelentősen a nyomáshoz. Miután a kvarkanyagot alkotó elemi kvarkok tömege csak néhány MeV, a gluonoké pedig szigorúan nulla, elmondhatjuk, hogy eszerint a kvarkanyag szintén kvázirészecskékből épül fel.

Tömegeloszlás a kvarkanyagban

A tömegeloszlásról feltételezzük, hogy szintén csak a T_c értékéhez viszonyított eloszlás, vagyis

$$w(m) = \frac{1}{T_c} f(m/T_c). \quad (8)$$

A különleges ebben a modellben az, hogy az $f(t)$ függvényt a hőmérséklettől független alakban keressük. A kvarkanyag teljes nyomása a (2) képlet alapján a következőnek adódik:

$$P(T) = \sigma(T_c/T) \kappa T^4, \quad (9)$$

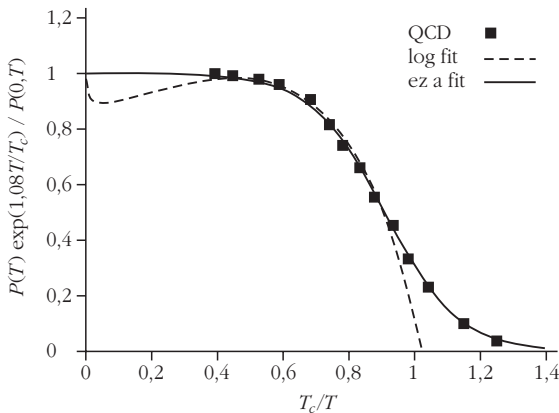
ahol

$$\sigma(z) = \int_0^\infty f(t) \Phi(zt) dt. \quad (10)$$

A feladatunk tehát a számítógépes QCD számolásból nyert nyomásgörbéről leolvasott $\sigma(z)$ függvényhez megtalálni a tömegeloszlásra jellemző $f(t)$ függvényt.

² Y. AOKI, Z. FODOR, S. KATZ, K. SZABÓ – Journal of High Energy Physics 0601 (2006) 089

³ 1 MeV az az energia amit egyetlen elektronnal egymillió volt feszültségkülönbség közül.



3. ábra. Az elosztott tömegű kvarkanyag nyomása osztva a tömegtelenével és beszorozva az egyszerű exponenciálissal a T_c/T arány függvényében. A fekete négyzetek a QCD-rácsszámolások eredményei, a folytonos vonal a (11) képletet mutatja, míg a pontozott vonal a perturbatív QCD-re hivatkozó logaritmikus formula vonala.

A $\sigma(z)$ függvény pontos alakja nem ismert. A számítógépes szimuláció ennek bizonyos pontjait meghatározza, de analitikus alakja, ami a (10) egyenlet matematikai megoldásához szükséges, ismeretlen. A fekete négyzettel jelzett szimulációs pontokat több, egymástól egészen különböző görbe is illeszti. A 3. ábrán két ilyen illesztést mutatunk, most az inverz abszolút hőmérséklet, T_c/T függvényében. A nyomást még be is szoroztuk egy egyszerű exponenciális függvénnyel, $e^{1,08 T_c/T}$ -vel. Az 1,08 érték próbálkozással bizonyult a legmegfelelőbbnek; ugyanis ezen érték mellett a nagy hőmérsékletű adatok állandónak látszanak. Ebből gondoljuk, hogy az exponenciális képlet, $\sigma(z) \sim e^{-1,08z}$ ezen a tartományon jó közelítés lehet.

Ezt azonban nem támasztja alá jelenleg mélyebb elmélet. A legelterjedtebb felfogás szerint a nyomás eltérése a tiszta sugárzásétól magas hőmérsékleten a logaritmus függvény inverzével fejezhető ki, ezt a pontozott görbe mutatja az ábrán. Nincs azonban olyan, a szigorú kritikát is kiálló bizonyítás a logaritmosus képlet mögött sem, amely miatt ezt előnyben kellene részesíteni. Azonkívül alacsony hőmérsékleten biztosan rossz, mert negatív nyomást ad.

Ilyen okok miatt mi megvizsgáltuk a rács QCD adatpontokat legjobban illesztő görbét leíró következő képletet:

$$\sigma(z) = \frac{1 + e^{-a/b}}{1 + e^{(z-a)/b}} e^{-1,08z}, \quad (11)$$

ahol $z = T_c/T$ az inverz hőmérséklet, $a \approx 0,91$ és $b \approx 0,11$ illesztési paraméterek. Ez a képlet mind az alacsony, mind a magas hőmérsékletek tartományában egy egyszerű exponenciálissal közelíthető. A különleges ebben az, hogy az egyszerű exponenciális $\sigma(z) = e^{-\lambda z}$ képlethez a (10) integrál-transzformációs egyenlet expliciten megoldható. A megoldás

$$f(t) = \frac{4\lambda}{t^2 \pi} \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{t^2}}. \quad (12)$$

Ez a képlet uralja a (10) egyenlet numerikus megoldását is (4. ábra). A $t < \lambda$ értékekre $f(t) = 0$, vagyis a legkisebb megengedett tömegenergia $M_{\min} c^2 = \lambda k T_c \approx 180$ MeV.

A tömegugrás jelentősége

Ez az eredmény nem kötődik a QCD eredményeket illesztő $\sigma(z)$ függvény pontos alakjához, csak annak bizonyos kvalitatív tulajdonságaihoz. A $\sigma(0) = 1$ tulajdonság triviális: végtelen hőmérsékleten a tömeges részecskék ugyanúgy viselkednek, mint a zérus nyugalmi tömegűek, ezért a nyomásuk aránya egy. A nyugalmi tömeg másrészt a tehetetlenség mértéke, ezért minél nagyobb, annál kevésbé mozgékony a hozzá tartozó szabadsági fok, annál kisebb nyomást jelent adott hőmérsékleten. Ezért $\sigma(z)$ egyről nullára csökken, miközben a hőmérséklet csökken, azaz $z = T_c/T$ nő. Az állandó tömegű részecskék gázánál hirtelenebb csökkenés T_c körül az effektív szabadsági fokok elnehezülését jelzi: a kvarkanyag esetében ez a hadronok formálódását jelenti.

A kérdés az, hogy ez a csökkenés matematikailag mennyire gyors. Az exponenciális feltevésünk azt jelenti, hogy az inverz hőmérséklet hatványainak integráljai végesek. Ezek az értékek azonban arányosak a tömegeloszlás inverz tömeg szerinti integráljaival:

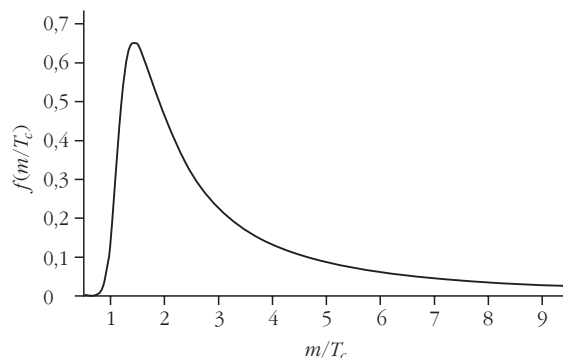
$$\int_0^\infty z^{n-1} \sigma(z) dz = 2^n \Gamma\left(2 + \frac{n}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \int_0^\infty t^{-n} f(t) dt. \quad (13)$$

Itt a $\Gamma(x)$ Euler-féle Gamma-függvényt a

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u} du \quad (14)$$

határozott integrál definiálja. Ebből az következik, hogy ha a nyomáscsökkenés erős, akkor a tömegeloszlás nem tartalmazhat kis tömegeket. Ha nagy z -re a $\sigma(z)$ függvény exponenciális lecsengésű, akkor az $f(t)$ függvény kis $t = mc^2/kT_c$ -re legfeljebb az inverz exponenciális, $\exp(-1/t)$ alakú lehet, vagy nulla. Az, hogy a tömegeloszlás csak egy véges tömegnél kezdődik, a „tömegugrás” (angolul mass gap) jelensége. A fentiekből látjuk, hogy ez összefügg a kvarkbezárással, az eredetileg könnyű kvarkok és gluonok mozgásának akadályozásával. S bár a kvarkbezárás és a tömegugrás kapcsolatának matematikai levezetése a térelméletben még senkinek sem sikerült, mi bízunk abban, hogy a fenti vizsgálatok hozzájárulnak a fizikai mechanizmusok tisztázásához.

4. ábra. A kvarkanyag rács QCD-ben kiszámolt állapotegyenletét rekonstruáló tömegeloszlás mc^2/kT_c egységekben. Fontos jelenség a kis tömegek valószínűsége.



A RUGALMAS FONALÚ INGÁRÓL – MAI SZEMMEL

– Vermes Miklós emlékezetére

Gruiz Márton, ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék
Radnai Gyula, ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék
Tél Tamás, ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék

A kaotikus mozgások meglepő és megkapó tulajdonsága, hogy rendkívül egyszerű módon is létrehozhatók. Elég például két, a középiskolások számára is jól ismert egyszerű rendszert összecsatolni. Egy merev szárú ingára függesztett másik merev szárú inga mozgása már elvezethet kaotikus viselkedéshez.

A kaotikus jelenségek okait általában valamilyen nem-linearitásban kell keresnünk, ami a mozgást vezérlő mozgásegyenletekben lép fel. Az egyik legegyszerűbb példa erre a rugalmas fonalú inga (röviden: rugós inga) mozgása. A *Fizikai Szemle* 1986. évi 10. számában jelent meg K. Luchner és R. Worg cikke [1], melyben részletesen tárgyalták ezt a jelenséget. Karl Luchner (1929–2001) a müncheni Ludwig Maximilians egyetem fizikai didaktika tanszékének akkori vezetője az 1987-ben Balatonfüreden tartott nemzetközi konferencián is beszámolt a kaotikus rezgésekkel kapcsolatos kutatásairól. A müncheni professzor természetesen nem tudhatta, de a *Fizikai Szemle* szerkesztőinek figyelmét is elkerülte, hogy 1966 januárban már megjelent egy cikk: *A rugalmas fonalú ingáról*, Vermes Miklós és Wiedemann László tollából [2]. A következő évben, 1967-ben Vermes Miklós a *Magyar Fizikai Folyóirat*ban közölt egy tanulmányt [3] ezzel a címmel: *Rugalmas fonalú inga lengése*. Miért foglalkoztatta Vermes Miklóst annyira ez a probléma?

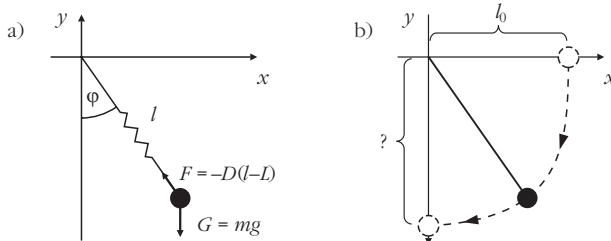
Egy 1965-ös versenyfeladat története

Idézzük a Fizikai Szemlében megjelent cikk bevezetőjét (lásd 1. ábra):

„Az 1965. évi Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny második fordulójának 1. feladata így szólt:

Felfüggesztett L hosszúságú, elhanyagolható tömegű rugóra kisméretű testet akasztunk. A rugót a testtel együtt vízszintes helyzetbe hozzuk (a rugó akkor nyújtatlan állapotban van, hossza L) és elengedjük. Ismeretes a rugó D állandója, amely szerint a rugalmas erő arányos az x

1. ábra. A feladat vázlatja: a) L hosszúságú, D rugóállandójú, elhanyagolható tömegű ideális rugóra akasztott m tömegű testre ható erők, b) a rugót a testtel együtt vízszintes helyzetbe hozzuk, a kezdeti hossza $l_0 = L$, majd elengedjük. (A testre esés közben a G nagyságú nehézségi és az F nagyságú rugóerő hat, a rugó pillanatnyi megnyúlása: $l - L$. Megnyújtott rugó esetén az F erő negatív, az origó felé mutat.)



megnyúlással: $F = -Dx$. Mekkora a rugó megnyúlása, amikor a test éppen a felfüggesztési pont alatt halad át?

A feladat paraméteresen lett feladva, és csak később derült ki, hogy – az m , D , L paraméterek gyakorlatilag tetszőleges értékei esetén – a megadott kezdőfeltétellel bizony egészen különleges mozgások jönnek létre.

A több mint 40 évvel ezelőtti OKTV Bizottságból ma már csak Wiedemann László emlékezetére támaszkodhatunk, ha a feladat kitűzésének körülményeit akarjuk felidézni. Eszerint a Bizottság akkori elnöke Vermes Miklós (1905–1990), tagjai pedig Bodó Zalán (1920–1990), Nagy László (1931–1987), Párkányi László (1907–1982) és Wiedemann László (1931–) voltak. A feladatot Párkányi László hozta és a többiek – valamennyien gyakorlott feladatkitűzők és -megoldók – figyelmét elkerülte a feladatban rejtőző „időzített bomba”, amelyet csak a versenyzők dolgozatainak átnézése közben vettek észre. Szerencsére volt még egy optikai és egy elektrodinamikai–termodinamikai feladat is a döntőn, így főleg ezek alapján – a mechanikai feladatra adott megoldási próbálkozásokat kisebb súllyal véve figyelembe – sikerült megállapítani a verseny nyerteseit. Első helyezett lett Juvancz Gábor, a budapesti Fazekas Gimnázium tanulója (a tehetséges, ígéretes karrier elé néző fiatal fizikus nem sokkal az egyetem elvégzése után repülőszerencsétlenség áldozata lett), második Béres László az István Gimnáziumból (orvos lett később), harmadik Tüttő István az Arany János Gimnáziumból, jelenleg a KFKI SZFKI sikeres kutatója, meghívott előadó az ELTE-n. Mindhárman budapestiek és IV. osztályosok voltak 1965-ben.

Az eltelt sok évtized bizony elmoshatja az emlékeket: Tüttő István ma már úgy emlékszik, hogy a versenyt Lovász László nyerte meg. Igaz, Lovász László – akkor még csak III. osztályos – szintén indult a döntőn, de nem ért el helyezést. (A következő évben viszont ő nyerte meg a fizika OKTV-t, valószínűleg ez maradt meg Tüttő István emlékezetében.) Lovász László akadémikus memóriája érdekesen őrizte meg az első feladattal kapcsolatos problémát:

„...ha az ember feltette, hogy szimmetrikus a pálya, akkor könnyű volt, de semmi ok nem volt feltenni, hogy ez igaz, ezért aztán nem is csináltam meg a feladatot...”

Vermes Miklóst nyilván zavarta a Bizottság melléfogása, s mindenképpen utána akart járni a fizikai problémának. Utólag valószínűleg kísérletileg is megvizsgálta a jelenséget, különböző rugókkal és különböző tömegű testekkel. Azután nekiült, és fáradságos munkával, sok-sok oldalnyi kézi számítással, a szukcesszív approximáció módszerével, speciálisan megválasztott rugóállandók és tömegek mellett meghatározott néhány pályát. Közös cikkükben Wiedemann László többek között azt mutatta meg, hogy milyen elhanyagolások esetén lehet a pálya olyan egyszerű és szimmetrikus, ahogyan eredetileg elképzelték.

A verseny eredményhirdetésén ott volt Lovász László: „Az eredményhirdetésén az előadó – valószínűleg Vermes Miklós – olyasmit mondott, hogy elfogadták, ha valaki feltette a szimmetriát, de megemlítette, hogy igazából a pálya legalacsonyabb pontja nem középen van... Abban biztos vagyok, hogy kaotikus pálya lehetőségéről nem volt szó...”

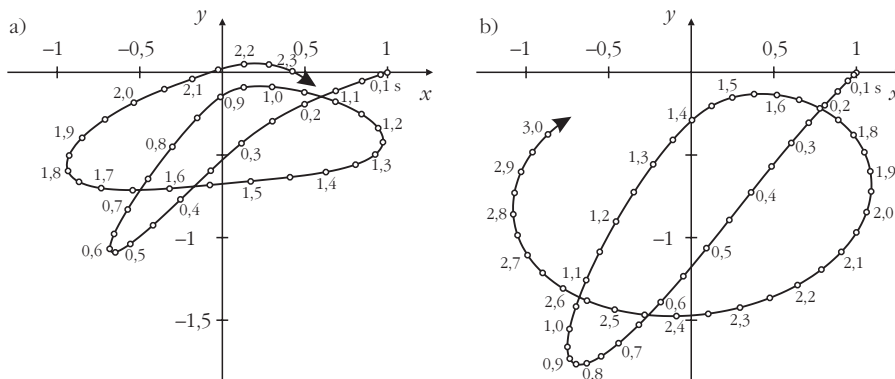
Miért is lett volna? *Henri Poincaré* (1854–1912) elmélete a fizikában évtizedekig aludta „csipkerózsika-álmát”, míg végre a 80-as években a fizikusok kedvenc „vadászterületévé vált”.

Vermes Miklós minden bizonnyal megsejtette a fizikai probléma fontosságát, ezért nem elégedett meg saját számítási eredményeivel. Felkereste a Magyarországon akkor legmodernebbnek számító Ural II. számítógép¹ „gazdáját”, *Szelezsán Jánost* az MTA Számítástechnikai Központjában. Megkérte, próbálja meg a géppel kiszámíttatni a pályákat. Ez került azután be a *Magyar Fizikai Folyóiratban* közölt tanulmányba, melynek végén illőn köszönetet is mondott a kapott segítségért. „Én csak beprogramoztam azt a feladatot, amire Vermes Miklós megkért” – hátrítja el magát az érdemeket ma Szelezsán János. Azt még megemlíti, hogy Vermes is kacérkodott akkoriban (60 éves korában) azzal a gondolattal, hogy megtanul programozni.

Most, negyven év után, érdekes és egyben megtisztelő feladat a mai számítógépekkel megoldani a Vermes által kitűzött feladatokat. Ezt próbáltuk meg, s közben a probléma szépsége által lenyűgözve sikerült megragadnunk néhány olyan kapcsolódó problémát is, melyek minden bizonnyal Vermes Miklós tetszését is elnyernék.

Vermes Miklós számítógépes szimulációja

Vermes Miklós összesen hét különböző pályát (a rugóra akasztott test függőleges síkbeli pályáját) követett számítógépes szimulációval, a mozgás néhány másodpercig. A rugó nyugalmi hossza $L = 0,5$ m, a rugóállandó $D = 2$ N/m, a kezdősebesség nulla, a rugó indulási helyzete pedig vízszintes volt az összes esetben.² Az első három ábrájánál, az eredeti középiskolai feladatnak megfelelően, nyújtatlan rugóval indította a mozgást $m = 0,034$ kg,



2. ábra. Két, Vermes által numerikusan meghatározott pálya: $\Delta t = 0,01$ s, a paraméterek: a) $m = 0,034$ kg és b) $m = 0,102$ kg. A rugó kezdeti hossza mindkét esetben 1 m, a kis karikák a tömegpont helyzetét mutatják 0,05 s időközönként [3].

0,068 kg, 0,102 kg tömegekkel. A másik négyenél azonban már eltért a feladattól, s kezdőhelyzeteknek az $l_0 = 0,75$ m és 1 m hosszúságú (nyújtott) rugókat vette (1.b ábra). A mozgásokat azzal a feltétellel tárgyalta, hogy a rugó összenyomáskor is követi a megnyúlásra érvényes erőtorvényt. Másrészt a kezdőfeltételek csak függőleges síkmozgást tesznek lehetővé.

A numerikus megoldás azt jelenti, hogy kis Δt időlépéseket véve „felgöngyölítjük” a megoldást. Az $x(t)$ hely- és a $v(t)$ sebességkoordináta és a Newton-egyenletből leolvasható gyorsulás³ alapján ugyanis ki lehet számolni az $x(t+\Delta t)$, $v(t+\Delta t)$ értékeket, majd, ismételve a számítást, tetszőleges hosszúságig meghatározhatók a pályák.

Vermes Miklós a számítógépbe az alábbi, középiskolások számára is érthető, egyszerű képleteket programozta (vesszővel jelöltük a $(t+\Delta t)$ -hez tartozó értékeket): $v'_x = v_x + a_x \Delta t$, $v'_y = v_y + a_y \Delta t$ és $x' = x + v_x \Delta t + a_x \Delta t^2 / 2$, $y' = y + v_y \Delta t + a_y \Delta t^2 / 2$. Vermes az x' , y' koordinátákat meghatározó képleteket alkalmazta úgy is, hogy $v_{x,y}(t)$ -t kicserélte $v_{x,y}(t+\Delta t)$ -re, vagyis a sebességösszetevők értékeit nem az intervallum elejéről, hanem a végéről vette. A két módszerrel ellentétes előjelű hibák keletkeztek, ezért Vermes mind a két eljárással kiszámította a pályát, s végül a megfelelő koordináták számtani közepét ábrázolta.⁴

Terjedelmi okokból a Vermes Miklós által tanulmányozott hét mozgásból csak az utolsó kettőt vizsgáljuk részletesen, az $m = 0,034$ kg és 0,102 kg tömegekkel terhelt $l_0 = 1$ m-re nyújtott rugókat. A 2. ábra Vermes Miklós eredeti rajzait mutatja.

Vermes nem véletlenül követte a pályákat csupán néhány másodpercig. Csak addig szimulált, ameddig biztos lehetett abban, hogy a „valódi” pályától való kis eltéréssel képes megrajzolni a görbéket. A rendszer konzervatív, ezért az ellenőrzés viszonylag egyszerű volt: a szimulálás addig megbízható, amíg az energia a mozgás során alig tér el kezdeti értékétől.

Szimuláció mai módszerekkel

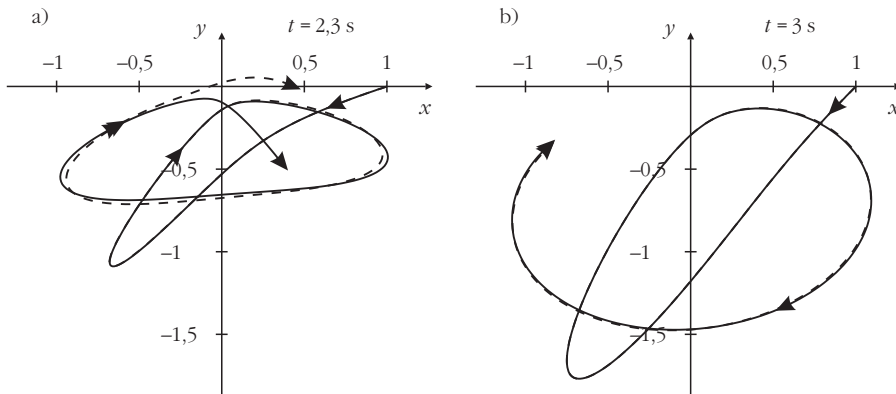
A számítógépek és a numerikus módszerek fejlődése mára lehetővé teszi, hogy a pályákat sokkal nagyobb pontossággal határozzuk meg. A témakörben széleskörűen elfogadott, úgynevezett negyedrendű Runge–Kutta-

¹ Az Ural II. számítógépet 1959-ben a Szovjetunióban fejlesztették ki, majd gyártották 1959–1964 között, összesen 139 példányban (Magyarországra 3 darab került). Elektroncsöves gép volt, ennek megfelelően elhelyezése 90–100 négyzetméteres helyiséget igényelt, fogyasztása pedig 30 kW volt. Átlagosan 5000–6000 művelet elvégzésére volt képes másodpercenként. (További információk: www.hszk.bme.hu/pictures/ural2.html)

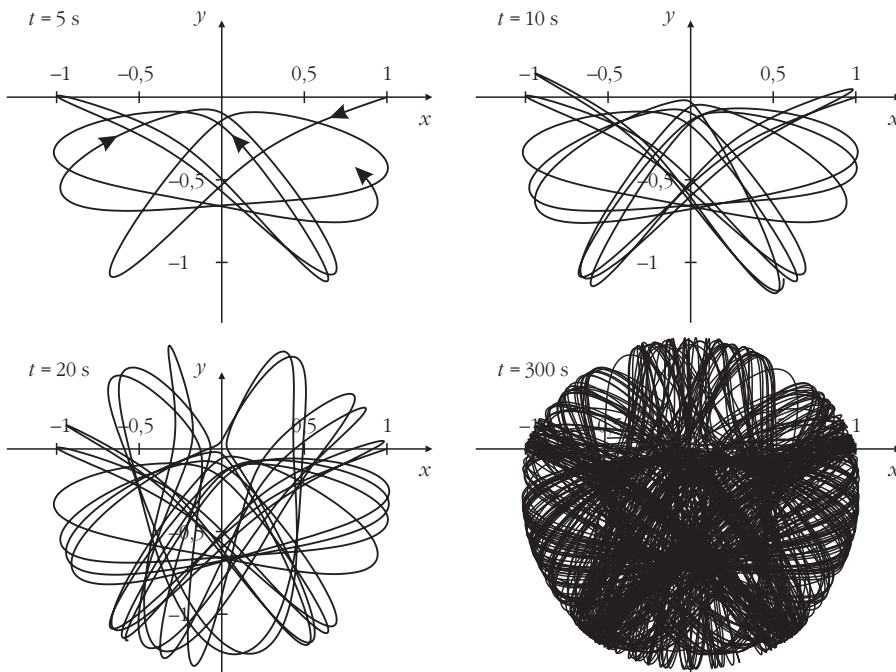
² Vermes eredeti cikkében a paraméterek és kezdőfeltételek természetesen még CGS mértérendszerben voltak megadva, mi a manapság szokásos SI-t használjuk.

³ A Newton-egyenletek: $ma_x = -D(l-L) \sin \varphi = -D(l-L)x/(x^2+y^2)^{1/2}$, $ma_y = +D(l-L) \cos \varphi - mg = -D(l-L)y/(x^2+y^2)^{1/2} - mg$.

⁴ Megjegyezzük, ha Vermes az átlagokat tette volna a lépések x , y kiindulópontjává, akkor az eredménye sokkal pontosabb lehetett volna.



3. ábra. A negyedrendű Runge–Kutta-eljárással, $\Delta t = 0,01$ s lépésközzel meghatározott „pontos” pályák (folytonos vonalak) és a 2. ábrán már bemutatott Vermes-féle görbék (szaggatott vonalak) az a) és b) esetben egyszerre ábrázolva.



4. ábra. A 2.a és a 3.a ábra mozgásának ($m = 0,034$ kg, $l_0 = 1$ m) egyre hosszabb ideig követett pályája. Az egyes képeken leolvasható az eltelt idő. A mozgás kaotikus.

módszerrel [4] újra megoldottuk a Vermes-féle feladatot. A módszerről elég annyit tudnunk, hogy egyetlen Δt lépés $\sim \Delta t^4$ pontosságú, azaz egy lépés során a hiba legfeljebb $\sim \Delta t^3$ nagyságú. Ezzel az eljárással a numerikusan meghatározott energia még 10^6 nagyságrendű lépés után is legfeljebb csak néhány ezrelékkal tér el a kezdetitől, ezért a módszert „pontosnak” fogjuk nevezni.⁵

A 3. ábrán a „pontos” pályákat és a Vermes-féle görbéket hasonlíthatjuk össze. A b) esetben végig nagyjából együtt fut a két görbe, az a) esetben az utolsó 0,3 másodpercben viszont már jelentős és növekvő eltérés látható. Összességében megállapíthatjuk: Vermes jól becsülte meg azt az időtartamot, ameddig a megrajzolt görbéi szemmel láthatóan még hűen ábrázolják a mozgást.

⁵ A Vermes által alkalmazott eljárás viszont – mai szóhasználattal – csak elsőrendű, vagyis az egy lépésben elkövetett hibája $\sim \Delta t^2$.

⁶ A rugós ingának a továbbiakban is csak a síkbeli mozgásáról van szó.

Az Olvasóban minden bizonyítással felmerül a kérdés: hosszabb ideig szimulálva vajon hogyan néz ki ennek a két mozgásnak a pályája?

A 4. és az 5. ábrákon megadjuk a két eset pályáit egyre hosszabb időintervallumokban. (Ezek és a későbbi ábrák már mind „pontos” szimulációk.) Első ránézésre is szembeötlő, hogy hosszú távon a két mozgás alapvetően különbözik. A 4. ábrán egy „összecszevíssza”, szabálytalan mozgást láthatunk (előlegeztük meg neki a kaotikus [5] elnevezést), szemben az 5. ábrával, ahol „csak” kváziperiodikus [5] a mozgás.

Előzetesen a paramétereiből, a kezdőfeltételekből, de még a mozgás néhány másodpercig való követéséből sem sejthettünk a rendszer hosszú távú viselkedéséből semmit. Természetesen Vermes sem tudhatta, hogy az általa megvizsgált pályák igazából milyen jellegűek. (A hét esetből mai szemmel három bizonyul kaotikusnak s négy kváziperiodikusnak, köztük az eredeti feladatnak megfelelő, nyújtatlan kezdőfeltételhez tartozók.)

Áttekintő vizsgálat

Maguk a pályák nem adnak mindig kielégítő eligazítást a mozgástípusokról. A bemutatott esetekben például nem látjuk, hogy más kezdőfeltételből indítva,

de a paramétereiket változtatlanul hagyva milyen mozgások alakulnak ki.⁶ Lehetnek-e kaotikusak, kváziperiodikusak, netán periodikusak? Ha igen, akkor hányféle egymástól független kaotikus, kváziperiodikus és periodikus mozgás jöhet létre?

Ha a mozgásfajta jobb áttekintését, rendszerezését és további vizsgálatát szeretnénk elérni, akkor – a kaoszelmélet tanulságai szerint – érdemes definiálnunk egy leképezést. A rugós inga pillanatnyi mozgásállapotát négy adat határozza meg: az x , y helykoordináta és a hozzájuk tartozó v_x , v_y sebességek. Ezek a változók feszítik ki a fázistér, mely most négydimenziós. A fázistér egy pontja egyértelműen meghatározza a rendszer mozgásállapotát. A változó mozgásállapot egy pályát rajzol a fázistérben, a trajektóriát.

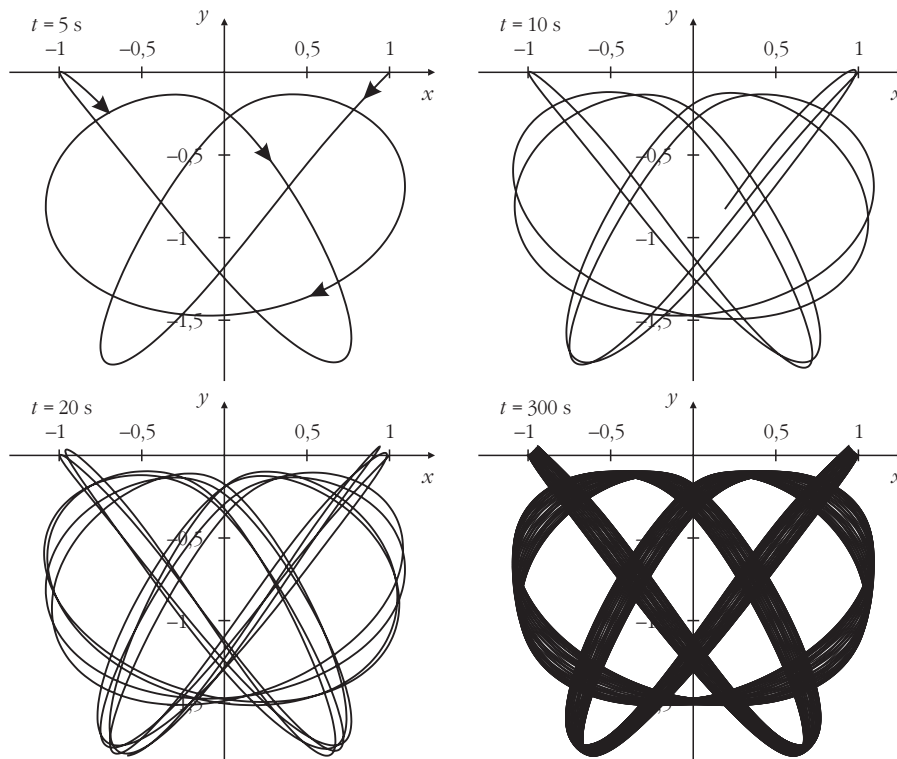
A rugós inga konzervatív, tehát megmarad az x , y , v_x , v_y függvényeként felírható energia, ezért a négy koordináta nem független egymástól, egyik kifejezhető a másik háromból. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a négydi-

menziós fázis térben a trajektória egy háromdimenziós, állandó energiájú felületen mozog. Elegendő tehát három – immár tényleg független – változó által kifeszített térben ábrázolnunk a trajektóriát, mely úgy képzelhető el, mint egy cérnából álló gombolyag. Az úgynevezett Poincaré-leképezést úgy kapjuk, ha ezt a gombolyagot egy felülettel (mondjuk egy síkkal) elmeteszük, s a metszéspontokat ábrázoljuk. Gyakorlati okokból a mozgást polárkoordináták segítségével követjük nyomon ezen túl, azaz az x, y, v_x, v_y változókra áttérünk a $\varphi, \omega \equiv \dot{\varphi}, l, v_l \equiv \dot{l}$ változókra, ahol φ a szögkitérés (lásd 1. ábra), ω a szögsebesség, l a rugó pillanatnyi hossza (a rögzített testnek a felfüggesztési ponttól való távolsága), v_l pedig a sugárirányú sebesség.

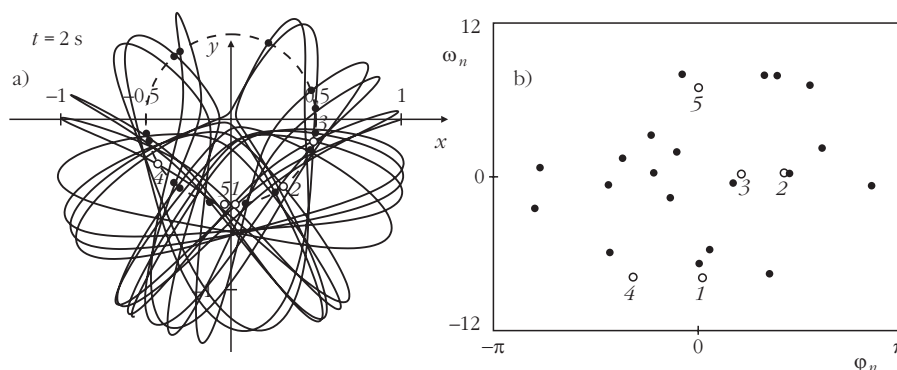
A Poincaré-leképezést a φ, ω, l koordináták által kifeszített térben készítjük el, az $l = L$ sík metszésével. Gyakorlatban ez azt jelenti, hogy mindannyiszor ábrázolunk egy pontot a $(\varphi; \omega)$ síkon, ahányszor a rugó hosszúsága éppen a nyújtatlan hossz, azaz L . (A trajektóriának a metsző síkon általában csak az egyik irányból jövő dőfését rögzítjük, mi az $\dot{l} > 0$ feltételt választottuk.) A 6. ábrán az általunk használt Poincaré-leképezés menetét szemléltetjük a 4. ábra példáján. A Poincaré-leképezéssel tehát a mozgásról egy jól áttekinthető „ujjlenyomatot” veszünk.

A mozgás kaotikussága, „összevisszasága” itt is megnyilvánul: a b) képen a pontok elhelyezkedése, s egymás utáni sorrendje véletlenszerűnek tűnik. Természetes módon vetődik fel a kérdés: nagyon sok pontot leképezve mi rajzolódik ki a $(\varphi_n; \omega_n)$ síkon?

A 7. ábrán bemutatjuk azt az alakzatot, amely a 6. ábrán elkezdett leképezés folytatásaként jelenik meg.⁷ Összesen 20 000 másodpercig követtük a mozgást⁸ (azaz



5. ábra. A 2.b és a 3.b ábra mozgásának ($m = 0,102$ kg, $l_0 = 1$ m) egyre hosszabb ideig követett pályája. Az egyes képeken leolvasható az eltelt idő. A mozgás kváziperiodikus.



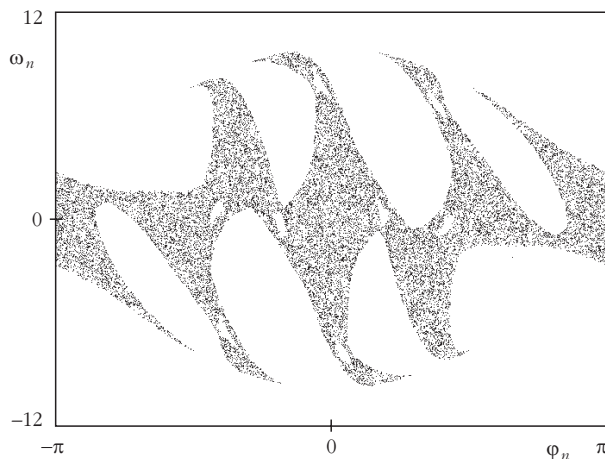
6. ábra. A Poincaré-leképezés szemléltetése. Amikor a rugóra akasztott test pályája belülről kifelé metszi a szaggatott vonallal megrajzolt $l = L$ kört (a), akkor ábrázoljuk az abban a pillanatban leolvasható $(\varphi_n; \omega_n)$ adatokat (b). Az első öt pontot $(\varphi_1; \omega_1) \dots (\varphi_5; \omega_5)$ üres körökkel jelöltük, számokkal jelezve a leképezési sorrendjüket. 20 másodperc alatt összesen 25 pont képződött le. A b) ábra az a) pálya „ujjlenyomata”.

több mint öt és fél órán keresztül!), miközben 22 139 pontot kaptunk. A képen egy éles, de tagolt határral rendelkező terület látható, a *kaotikus tartomány*. (A pályát kirajzoló 4. ábrán ilyen hosszú idő után már csak egyetlen nagy fekete foltot látnánk!) A kaotikus tartományt a leképezés pontsorozata egyenletesen, ugyanakkor véletlenszerűen járja be.

Ezután próbáljuk meg kideríteni, hogy az üres „öblökben” vajon mi lehet! A felderítéshez kézenfekvő a módszer: indítsunk mozgásokat a fehér tartományból vett φ_0, ω_0 kezdőfeltételekkel (természetesen az $l = L$ metsző síkról), de egyébként változatlan paraméterekkel. A mozgásállapotot négy változó jellemzi, tehát egy még szabad. A negyediket, azaz a test sugárirányú sebességét ($\dot{l}_0 = v_{l0}$) az energiából számítjuk ki úgy, hogy egyezzen meg a 7. ábrán bemutatott mozgás energiájával.

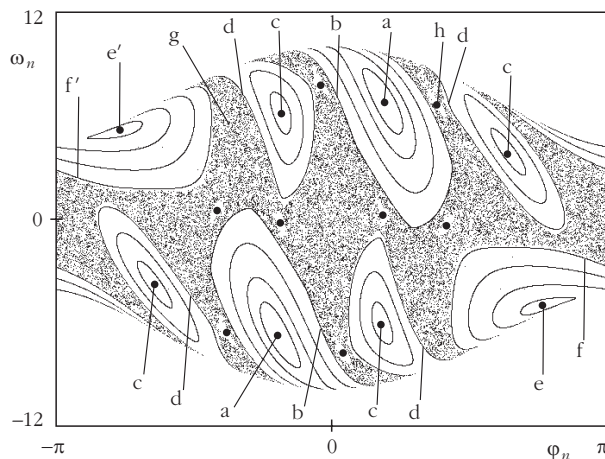
⁷ A φ változó 2π szerint periodikus, ezért a 7. ábrán látható $(\varphi_n; \omega_n)$ síkot egy henger palástjaként kell elképzelnünk.

⁸ Az említett időtartamok természetesen a rendszer mozgásának jellemzői. A számítógépprogram futtatási ideje a processzor sebességétől függ, és semmiféle jelentősége nincs a probléma szempontjából. (Egy 2 GHz-es processzorral, Turbo Pascal programmal, a léptéket $\Delta t = 0,001$ s-nak beállítva, hozzávetőlegesen másfél percig tartott a 7. ábra elkészítése. Szelezsán János becslése szerint ugyanekkora munka elvégzése az Ural II.-nek akár hónapokig is eltarthatott volna.)



7. ábra. A 6. ábrán bemutatott leképezés folytatásaként kirajzolódott úgynevezett kaotikus tartomány. Összesen 22139 pont képződött le 20 000 másodperc alatt.

Első gondolatunk az lehetne, hogy a mozgás semmiben nem fog különbözni a 4. ábrán bemutatottól, hiszen a paraméterek nem változnak, s az összenergia is azonos. A 7. ábrára nézve azonban azt látjuk, hogy olyan kezdőfeltételekből indítunk trajektóriákat, amelyek közelében a 4. áb-

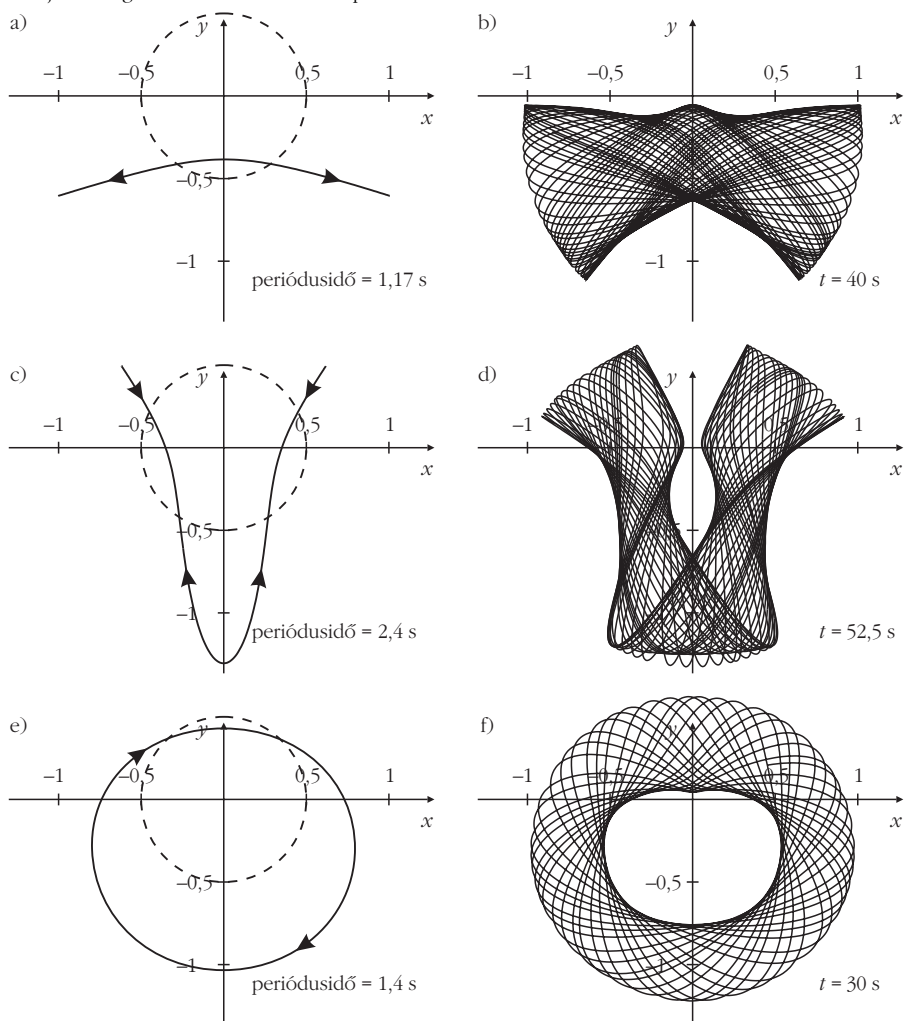


8. ábra. A 7. ábrán látott kaotikus tartományon kívül további 20 kezdőfeltétellel elkészített Poincaré-térkép.

ra pályája több mint ötórás mozgása során sem járt, vagyis valami alapvetően különböző dologról lesz szó. A 7. ábrán látottakon túl további 20 kezdőfeltétellel elkészített képpünk, egy Poincaré-térkép, a 8. ábrán tekinthető meg.

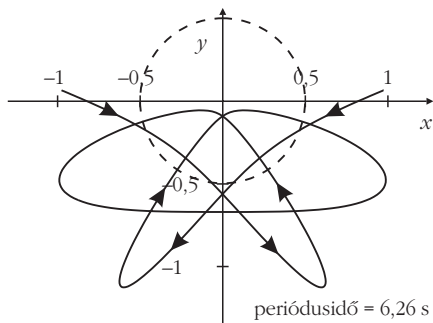
Az újonnan indított pályák lényegesen különböznek a 7. ábra mozgásának látványától: a leképezésen különböző

9. ábra. A 8. ábra Poincaré-térképe alapján néhány periodikus és kváziperiodikus mozgás pályája. A betűjelek megfelelnek a Poincaré-térképen találhatóoknak.



pontok és vonalak rajzolódnak ki. Néhányukat betűkkel jelöltük meg. Az *a*-val jelölt (egyetlen pálya) képe két pont. Ez a pálya tehát – hosszú idő alatt is – a leképezési feltételt csak két (φ_1, ω_1) , (φ_2, ω_2) számpárral teljesíti, még hozzá felváltva „ugrálva” az egyikről a másikra. Könnyen rájöhettünk: ez egy olyan ismétlődő (periodikus) mozgás, mely egyetlen periódus alatt kétszer elégeti ki a leképezési feltételt (lásd 9.a ábra).

A periodikus mozgás pontját a fa évgyűrűihez hasonlóan zárt görbék veszik körül. Az *a*-hoz tartozó legnagyobb gyűrű *b*-vel jelöltük. Ezekhez kváziperiodikus mozgások tartoznak. Minél tágabb egy gyűrű, az általa reprezentált kváziperiodikus mozgás annál inkább eltér a hozzá tartozó periodikus mozgástól. A mozgások pályái a 9. ábrán tekinthetők meg, a leképezés feltételét jelentő szaggatott vonalú körrel együtt. Az ábrán látható továbbá a *c*-vel jelölt négy pont periodikus mozgásának térbeli képe és a hozzájuk tartozó legtágabb gyűrű (*d*) pályája. *e* és *f* olyan átforduló periodikus, illetve kváziperiodikus mozgást jelöl, melyeknek a szögsebessége sohasem vált előjelet, mindig negatív (ezért esnek a leképezett



10. ábra. A 8. ábrán b -val jelölt periodikus mozgás pályája. Ez olyan mozgás, amely egyetlen periódus alatt nyolcszor metszi belülről kifelé az $l = L$ kört.

pontjaik a 8. ábra alsó térfélére). Az e' és az f' ezeknek a pozitív szögsebességű szimmetriapárjai. A kaotikus tartományt g -vel jelöltük.⁹

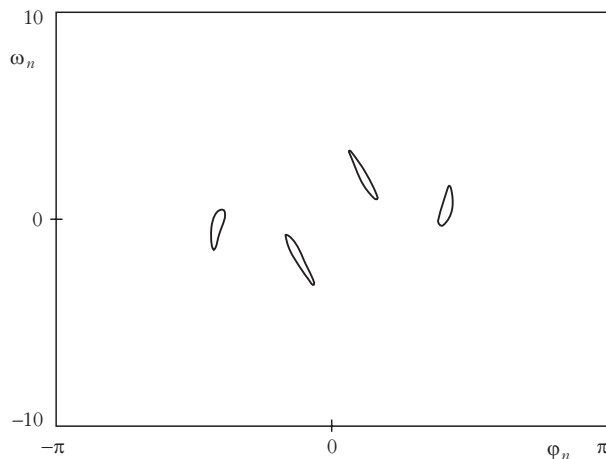
Példánkon keresztül kezdenek a Poincaré-leképezés előnyei kidomborodni. Egy periodikus mozgás képe nagyon egyszerű: egy vagy néhány pont. A kváziperiodikusaké egy zárt görbe, a kaotikusé viszont egy kiterjedt tartomány. A tartományon belül bármilyen kezdőfeltételtől indítjuk a mozgást, ugyanazt a képet fogja kirajzolni, ugyanazt a területet fogja bejárni – egyenletesen és véletlenszerűen. A káosz „összevisszasága” itt úgy mutatkozik meg, hogy a pont egy kétdimenziós tartományt jár be, szemben a kváziperiodikus esettel, amely egy egydimenziós vonalra szorítkozik.

Poincaré-térképünkön találtunk tehát négy különböző periodikus pályát. Vajon tényleg csak ez a négy van? Ha jobban szemügyre vesszük a 7. ábra kaotikus tartományát, akkor a pöttyözött területen belül nyolc apró kis lyukat fedezhetünk fel. Mivel rögzített energia megengeti (hiszen körbe veszi őket a kaotikus tartomány), valamilyen mozgásnak tartozni kell azokhoz is. A tisztázás érdekében indítsunk egy pályát az egyik közepéből!

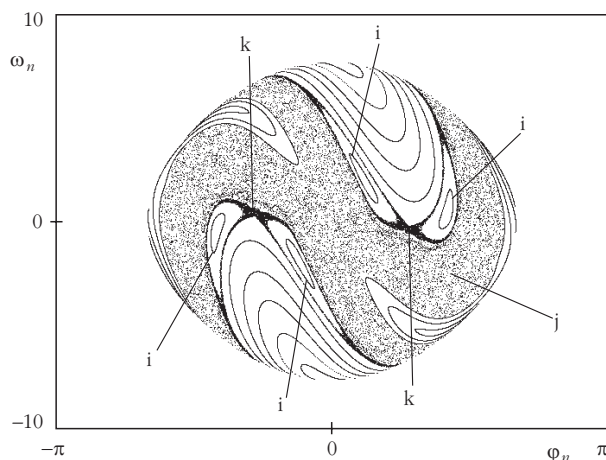
A 8. ábrán b -val jelölt pontból indított mozgás képe nyolc különálló pont lett, mindegyik lyukba esik egy belőlük. Eddigi tapasztalataink alapján sejthető, hogy ez egy olyan periodikus mozgás, amely egyetlen periódus alatt nyolcszor elégíti ki a leképezési feltételeket (lásd 10. ábra). Természetesen ezekben a kis lyukakban is léteznek kváziperiodikus pályák, melyek a leképezésen b körüli gyűrűként jelennek meg (ezeket azonban már nem ábrázoltuk).

Bár a 7. ábrán nem látszik, a kaotikus tartomány tele van további apró lyukakkal, a tartomány határa és a lyukak széle pedig apró öblökkel. Mindegyikhez tartozik egy-egy periodikus pálya, s kváziperiodikus mozgások sokasága. Minél apróbbak a lyukak és öblök, annál nagyobb a számuk, s annál bonyolultabbak a hozzájuk tartozó periodikus pályák. Számuk összességében a végtelehez tart. Az ily módon kilyuggatott kaotikus tartomány fraktál szerkezetű [5].

⁹ A Poincaré-térképen a kaotikus tartomány és a kváziperiodikus pályák együttese által elfoglalt területnek határozott alsó és felső pereme jelenik meg. Az ezen kívülre eső üres területhez nem tartozik semmilyen mozgás, hiszen a rögzített energia miatt $|\omega_n|$ nem nőhet minden határon túl.



11. ábra. Vermes 5. ábrán bemutatott mozgásának Poincaré-metszete.

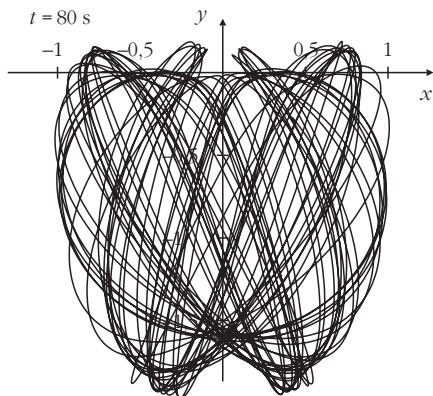


12. ábra. A 11. ábra kiegészítése Poincaré-térképpé. i -vel jelöltük a 11. ábrán látott görbéket, j -vel egy nagy, k -val egy kicsi kaotikus tartományt.

Térjünk most vissza Vermes másik példájához (2.b, 3.b és 5. ábra). Korábban megállapítottuk, hogy kváziperiodikus mozgással van dolgunk. De mit mutat a Poincaré-metszet? A 11. ábrán valóban egy kváziperiodikus mozgás szokásos, azaz a kaotikusnál jóval „unalmasabb”, egyszerűbb képe tűnik fel.

Előző példánk után már sejthetjük, hogy sok különböző periodikus és kváziperiodikus pálya létezhet még ugyanezen paraméterek és energia mellett, sőt, esetleg még kaotikus tartomány is. Valóban, a Poincaré-térkép (12. ábra) hasonló a 8. ábrához: egy nagy kaotikus tartomány (j) mellett sok különböző periodikus és kváziperiodikus mozgás látszik (Vermes pályáját i -vel jelöltük). Legszembetűnőbb különbség az, hogy a tartományok nem nyúlnak ki a kép jobb és bal oldalának szélére. A magyarázat egyszerű: ennél az (alacsonyabb) energiaszintnél sem a kváziperiodikus, sem a kaotikus mozgások nem tudnak „átfordulni”, vagyis minden esetben $|\varphi| < \pi$. A 13. ábrán 80 másodpercig ennek a nem átforduló, de kaotikus mozgásnak térbeli pályáját ábrázoltuk.

A térképet alaposabban megnézve azt is észrevehetjük, hogy a k -val jelölt „görbe” bizony helyenként „kiszélesedik”, vagyis kváziperiodikus mozgás nem lehet. Itt egy újabb kaotikus tartományra bukkantunk, mely különbözik a j -től!



13. ábra. A 12. ábra j kaotikus tartományához tartozó pálya.

Tanulságok

Negyven évvel ezelőtt Vermes Miklós véletlenszerűen kiválasztotta a rugós inga hét különböző indítási feltételét, majd számítógép segítségével, a mozgás első néhány másodpercében pontról pontra követte a mozgó test pályáját. Nem tudhatott semmit arról, hogy ezek igazából milyen mozgások. Megválaszolendő kérdésként a probléma fel sem merült. Valószínűleg a „szabálytalan” jelzővel illetve volna őket, ha valaki kérte volna erre. Kiválasztottuk a cikkében közölt hétből a két utolsót, s kicsit tüzetesebben megvizsgáltuk őket. Kiderült: az egyik kaotikus, a másik kváziperiodikus. Hogy éppen ezek lettek, az a vakszerencsén múlt, hiszen – mint láttuk – ugyanezen paraméterek és energia mellett, de más kezdőfeltételekkel akár mind a kettő lehetett volna kaotikus, kváziperiodikus, vagy (határ esetben) egyszerű periodikus (természetesen ez igaz a Vermes által vizsgált másik öt mozgásra is). Bár az eredeti versenyfeladatnak megfelelő (vízszintes és nyújtatlan rugóval elengedett test) mozgásoknál háromból há-

rom volt kváziperiodikus, de ugyanezen rugóra például 0,08 kg tömeget akasztva a mozgás kaotikus lesz.

Vermes minderről még semmit sem tudhatott: a káoszelmélet első alapcikkei (Poincaré után, akinek munkáit inkább csak a matematikusok ismerték) az 1960-as években jelentek meg [6, 7].

Ma már tudjuk, hatékony vizsgálatukhoz leképezést kell alkalmaznunk, s a korábban másodpercekig követett mozgásokat órákig kell szimulálni, még hozzá Vermes módszerénél jóval pontosabban. Hogy a kaotikus rendszerek tulajdonságaiba mennyire nem nyújt betekintést a mozgásegyenlet pusztá alakja, az abból is kiviláglik, hogy nemcsak egy Poincaré-metszet megalkotásához, hanem még a felfüggesztési pont alatti első(!) áthaladás kiszámításához is számítógép segítségét kell igénybe vennünk.

Hiába egyszerű tehát egy mechanikai rendszer. Ha a mozgásegyenletek nemlineárisak, gyakran kialakul a káosz. Ilyen esetben viszont a tulajdonságok színes tárházának felderítéséhez már nélkülözhetetlen a számítógép, mellyel a szó valódi értelmében „felfedezés” a fel-táró munka...

Vermes Miklós 1967-es cikke az ebbe az irányba tett első lépés volt a magyar fizikában.

Irodalom

1. K. LUCHNER, R. WORG: *Kaotikus rezgések* – Fizikai Szemle 36 (1986) 372
2. VERMES M., WIEDEMANN L.: *A rugalmas fonalú ingáról* – Fizikai Szemle 16 (1966) 26
3. VERMES M.: *Rugalmas fonalú inga lengése* – Magyar Fizikai Folyóirat (1967) 397
4. W.H. PRESS ET AL.: *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing* – Cambridge University Press, Cambridge, 1992
5. TÉL T., GRUIZ M.: *Kaotikus Dinamika* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002; *Chaotic Dynamics* – Cambridge University Press, Cambridge, 2006
6. A.N. KOLMOGOROV: *General theory of dynamical systems in classical mechanics* – in: Proceedings of the 1954 International Congress of Mathematics (North Holland, Amsterdam, 1957)
7. E.N. LORENZ: *Deterministic nonperiodic flow* – J. Atmos. Sci. 20 (1963) 130

BESZÉLGETÉS A 75 ÉVES LOVAS ISTVÁNNAL

Ez év október elsején van *Lovas Istvánnak*, az MTA rendes tagjának, a Debreceni Egyetem Természettudományi Kara emeritus professzorának 75. születésnapja. Ebből az alkalomból kérdezem egykori tanáromat, ma kollégámat és barátomat életútjáról.

– *Hogyan indultál el a II. világháború utáni időkben Gyöngyöshalászról? Mi adta az indítást, hogy a fizikusi pályára lépj? Az ember azt gondolná, hogy környezeted inkább arra ösztökélhetett, hogy a gazdálkodást vagy valamilyen más, kétkezi mesterséget válassz.*

– 1946-ig a gyöngyösi Koháry István Gimnáziumba jártam. A háború utolsó esztendeje meg a kamaszodás nem tettek jót tanulmányi eredményeimnek. A negyedik osztályban kapott bizonyítványban szereplő érdemjegyek

meglehetősen egyformák voltak, többnyire elégségesek. Mehettem a következő osztályba. Pontosabban mehettem volna, ha Édesapám nem jut másfajta következtetésre: „Te már nyolc éve jársz iskolába. Ez az utolsó év nem sok örömet hozott. Én nem végeztem el több osztályt, csak egyet. Legyen neked elég nyolc. Választhatsz, vagy beadlak autószerelő inasnak, vagy veszünk még egy lovat, és azokkal jársz. Szekeret rakni már tudsz, és szántani is. Legjobb lesz, ha itthon maradsz!” Talán így is történt volna, ha véletlenül nem kerül a kezembe egy divatjamúlt tankönyv. Egy esős napon ezt kezdtem el lapozgatni. A könyv a reálgimnázium első négy osztályának matematikai ismereteit foglalta össze. Az olvasás nem esett nehezemre, mert ezeket a fejezeteket még a kamaszodás előtti években tanultuk, és akkor még nem volt semmi gond. A

jó Isten adott egy hetes esőt, jó lajhogókat, amitől a kukorica szépen nőtt, a lovunk pedig pihenés közben jóízűen ropogtatta a friss szénát, amit reggelente kaszáltam neki.

Mire abbamaradt az esős idő és felszikkadt a föld, a kukorica erősen befüvesedett, a lovunk kigömbölyödött, én pedig értettem a gimnázium első három osztályában tanított matematika alapfogalmait. Vártam a következő esős napot, de hosszú szárazság következett. Munka közben egyre gyakrabban jutott eszembe a matematika-könyv. Az izgatott, hogy vajon fogom-e érteni a negyedik osztályos anyagot. Amikor időm akadt, továbbhaladtam a könyvben. Az volt az érzésem, hogy ha nem is könnyen, de értem. Örömemet csak az rongálta, hogy kár a fáradságért, hiszen ősszel az iskola kapuja nem nyílik ki előttem úgy, mint az előző nyolc esztendőben. Egy kiutat láttam csak: Édesapám szívét kell meglágyítanom. Sikerült! A feltétel az volt, hogy táncmulatságba többet nem járok, minden este a lemenő Nap otthon talál, és a cimboráimmal való tanyázás helyett tanulok.

Ezt én megfogadtam és meg is tartottam egészen az első szeptemberi vasárnapig. Ezen a szépséges vasárnapon a primás olyan fergeteges csárdást játszott, és olyan szépen cifrázta, hogy közben lebukott a Nap. A továbbiakat nem részletezem. Édesapám, nyugosztalja a jó Isten, jólelkű volt, és még egy utolsó futamot engedélyezett.

Ekkor elkezdtem komolyan tanulni. Váratlanul a szerencse is mellém állt. Az egyik házi feladatnak kapott számtanpéldával éjfél tájig küzdöttem, de nem adtam fel. Reggel a szorgalmasabb osztálytársaim az én füzetemből másolták ki az eredményt. Óra elején a tanár úr azt mondta, hogy a házi feladatnak adott példa valószínűleg nyomdahiány. Ez volt életem egyik legnagyobb pillanata. A mindent eldöntő, nagy sikerélmény.

– *Kik voltak azok, akiknek megbatározó szerepük volt az indulásnál?*

– Elsősorban a szüleim és a nagyanyám, akiktől megtanultam rendesen dolgozni és örülni a munka eredményének. Másodsorban a tanítóim és tanáraink, a gyöngyösiek és a budapestiek egyaránt. Budapesten merő véletlenségből jutottam el a Kegyes Tanító Rendiek Gimnáziumába. Az igazgató úr nem sokkal biztatott, mert nagyon sok bepótolni valóm volt. „Bepótolom!” – mondtam elszántan, holott azt sem tudtam, hogy mit kell bepótolni. Az igazgató úr összeráncolta a homlokát, majd elmosolyodott és beírta nevemet a VI. B. osztálykönyvébe.

Az első tanítási nap reggelén megkerestem a VI. B. feliratú osztálytermet. Amikor már nagyjából megtelt a terem, mély lélegzetet véve beléptem és megálltam a katedra előtt, szembe fordulva az osztállyal. „Lebonicki Tibor a nevem. A gyöngyösi gimnáziumból jöttem. Az osztálytársatok szeretnék lenni.”

„De se ipso” válaszolta egy fiú az első padból. Az osztály elkezdett nevetni, majd röhögni, úgy, ahogy azt Karinthy Frigyes leírta. Először rémület fogott el, majd harag, de a fiúk olyan sokáig zajongtak, hogy volt időm soraimat rendezni. Eszembe jutott, hogy tavaly latinból tanultunk egy Catullus-verset, amelynek ez volt a címe: „De se ipso”, azaz, hogy „Saját magáról.” Felfogtam, hogy az én bemutatkozásomra tökéletesebb választ nehezen lehetne találni a világirodalomból. Az osztály nevetése

ezt méltányolta. Méltányoltam hát én is, és elmosolyodtam. Ezt ők is méltányolták és osztálytársak lettünk.

Ekkor belépett az osztályfőnök: *Magyar László*. Ezzel életemben egy új fejezet kezdődött! Az osztályfőnök úr megkérdezte tőlem. „Tudsz-e latinul?” „Ezt nem lehet mondani, feleltem – minthogy Gyöngyösön is a latinból kapott »jó« miatt nem lehetett kitűnő a bizonyítványom.” „Ez baj, de nem súlyos. Lehet rajta segíteni. Kérdezd meg valamelyik osztálytársadtól, hogy mit kell tudni nálunk latin nyelvtanból. Tanuld meg, és ha kész vagy, szólj.” Attól kezdve a latin nyelvtannal keltem és feküdtem. Őt sikertelen kísérletet tettem. A tanár úr nem haragudott, nem szidott, csak csendesesen megjegyezte: „Ebbe az iskolába járni nem kötelező. Vannak más iskolák is. Nagyon jók!” Volt egy másik mondása is, ami elkísér a síríg: „A latin intelligencia dolga.”

A hatodik kísérlet alkalmával minden feltett kérdésre helyes választ adtam. „A nyelvtani szabályokat már tudod, de lássuk, hogy tudod-e őket alkalmazni!” Azzal kikereste a dolgozatfüzetemet. Bemártotta tollát a piros tintás kalamárisba, és írta a javításokat, egyiket a másik után, majd pedig becsukta a füzetet. „Elmehetsz.” – mondta halkan. Én sírva mentem haza. Másnap az ajtó előtt várakoztam. Az osztályfőnök úr megkérdezte: „Miért nem ülsz a helyeden?” – és maga előtt betuszkolt az osztályba. Ez azt jelentette, hogy nem kell másikat, ugyancsak „jó” iskolát keresnem. Maradhatok! Az évvégi bizonyítványom már „majdnem” jeles lett! Osztályfőnök úr egyenként adta át a bizonyítványainkat. Mindnyájunkhoz volt egy jó szava. Amikor az enyém került sorra csak annyit mondott: „Szép volt!” – és felém nyújtotta a kezét. Csak én foghattam vele kezét! Úgy éreztem, hogy ebben a kézfogásban benne volt a búcsú nemcsak tőlem, de az osztálytól és a pesti iskolától is. Akkor államosították ugyanis a felekezeti iskolákat! Később megtudtam, hogy abban a kézfogásban benne volt a búcsú a szülőföldtől, Magyarországtól is.

Kitűnő tanáraink voltak Gyöngyösön is, az államosított, Ady Endre nevét viselő gimnáziumban is, hasonlóképp az Eötvös Loránd Tudományegyetemen is. Gazdag útravalót kaptam tőlük. Mindent megtettek azért, hogy belénk oltassák az igaz, a szép és a jó szeretetét. Ami azonban meghatározó volt egész életemre, az Magyar László tanár úrnak az a mondása volt, hogy „A latin intelligencia dolga!”

– *Miért éppen a magfizika került érdeklődésed középpontjába?*

– Az Egyetemen a sok kitűnő előadó közül is kiemelkedett *Marx György*. Amit ő tanított, azt találtuk a legérdekesebbnek: a relativitáselméletet, a kvantumtérelméletet és a részecskefizikát. A magfizika iránti érdeklődés, amit *Györgyi Géza* keltett fel bennem, akkor erősödött meg, amikor *Szalay Sándor* professzor úr az egyetemi évek végén egy igen kedvező munkalehetőséget ajánlott: „Uránelfordulás után kell kutatni kinn a terepen, hordozható GM-csőves sugármérővel. Emellett szabad ideje még marad bőven. Azt belátása szerint elméleti tanulmányokkal töltheti.” Ilyen nagyszerű ajánlatot magamtól elgondolni sem tudtam volna. Államköltségen beutazni a „magyarországi terepet” és a fennmaradó időben elméleti fizikával foglalkozni. Nagy örömmel mentem Debrecenbe, ahol igaz barátokra leltem. Ennek már

több, mint 50 éve. A kedvező munkafeltételek ellenére az a gondolat merült fel bennem, hogy vissza kellene menni Budapestre. 1956 februárjában ugyanis lezajlott a XX. Kongresszus, ami a változás ígérését hordozta, másrészt megtudtam, hogy a KFKI-ban atomreaktort fognak építeni. Nagy igyekezettel kezdtem el tanulni a neutronfizikát, majd később kértem áthelyezésemet az ATOMKI-ból a Kísérleti Atomreaktorhoz. A felvételi vizsgán Pál Lénárd néhány bemelegítő kérdést tett fel a neutronfizika tárgyköréből, majd következett egy valódi kérdés: „Hogyan mérné meg a neutron élettartamát?” Ezt a történetet azonban már elbeszéltem a *Fizikai Szemlé*ben akkor, amikor Pál Lénárd 80. születésnapját ünnepeltük.

– *Mint kutató fizikus, mely eredményeidet tartod a legjelentősebbeknek?*

– Nem vagyok feljogosítva arra, hogy saját eredményeimet minősítsem, ezért azokat fogom felsorolni, amelyek a legjobban a szívemhez nőttek. Ezeknél nem feltétlenül csak a maradandó tudományos érték a fontos, hanem az emberi körülmények is. Még egyetemista koromban hallottam azt a mondást, hogy „Az elméleti fizikus tud számolni, de nem tudja, hogy mit számol. A kísérleti fizikus tud mérni, de nem tudja, hogy mit mér. A fizikus nem tud se számolni, se mérni, de tudja, hogy miről van szó.” Akkor határoztam el, hogy én fizikus akarok lenni. Többen figyelmeztettek arra, hogy ennek nagy ára van, de én nem törődtem a figyelmeztetéssel. Amint a következő felsorolásból kitűnik, „meg is ittam a levét”, de nem bántam meg!

1961. *A polarizált pozitronok megsemmisülése mágnesezett anyagokban* elnevezésű témát számomra az tette emlékezetessé, hogy a gyenge kölcsönhatás paritássértésének egyik megfigyelhető következményét sikerült kimutatnom akkor, amikor az elméleti pezsgés varázsa keveredett a reaktor indulására való kísérleti felkészülés izgalmaival.

1963. *A ^{36}Cl atommag gerjesztett állapotainak vizsgálatában* is sikerült egyensúlyba hoznom a kísérleti és az elméleti tevékenységet. Az előbbihez a neutronbefogást követő gammasugárzás szögkorrelációját kellett mérni a reaktornál, az utóbbihoz a héjmodell keretei között kellett a rendszer Hamilton-operátorát diagonalizálni, egy assembler nyelven programozható számítógépen.

1964. *A neutron rugalmas szóródása a ^{12}C atommagon* elnevezésű számítást Koppenhágában végeztem. Erre kaptam életemben a legtöbb hivatkozást.

1968. *A magreakciók egzaktul megoldható háromtestmodelljét* Dubnában dolgoztam ki. Ehhez a Fagyjev-féle egyenleteket kellett felhasználni. *Fagyjev* nevét az tette világhírűvé, hogy felismert egy fontos matematikai problémát. Nevezetesen felismerte, hogy a magreakciók elméletében használatos Lippmann–Schwinger-egyenletnek, mint integrálegyenletnek a magfüggvénye négyzetesen nem integrálható, ha a reakcióban kettőnél több részecske vesz részt. Ha pedig ez így van, akkor a Lippmann–Schwinger-egyenlet megoldása nem egyértelmű. Ezért Fagyjev egy olyan csatolt integrálegyenlet-rendszert konstruált, amelynek a megoldása egyértelmű, és eleget tesz a Lippmann–Schwinger-egyenletnek is. Ennek a Fagyjev-féle egyenletrendszernek a segítségével a kvantummechanikai háromtestprobléma kezelhetővé vált.

1972. *Az atom–atom, a mag–mag és a nukleon–nukleon kölcsönhatások összehasonlítása* című munkában azt bizonyítottam be, hogy a héliumatom–héliumatom, a ^4He mag– ^4He mag, valamint a neutron–neutron esetén a kölcsönhatást leíró van der Waals-típusú potenciálok gyakorlatilag azonosak, ha természetes mértékegységeket használunk, azaz távolságegységnek a taszító törzs sugarát használjuk. Korábban ezt azért nem tudták felismerni, mert nem telített, azaz nem zárt „héjú” rendszereket hasonlítottak össze.

1974. *Rugalmatlan protonszórás a ^{24}Mg atommagon a 20–28 MeV energiatartományban*. A méréseket a jülichi Kernforschungsanlage ciklotronja segítségével végeztem. Nagy élvezet volt dolgozni egy német precizitással felszerelt gyorsító-laboratóriumban, majd pedig a mérési adatokat feldolgozni Európa akkor egyik legnagyobb számítógépén. A feladat legnehezebb része a kísérleti eredmények interpretációja volt egy olyan modell keretében, amely azt tételezte fel, hogy a szórási folyamat során óriás-rezonanciák gerjesztődnek.

1980. *Anizotróp maganyag állapotegyenlete*. A nehézion-ütközések során létrejövő maganyag anizotróp, mert az összeütkezés iránya kitüntetett. Az ilyen maganyag állapotegyenletét vizsgáltam. Az alkalmazott modell, amelyet *Teller Ede* még az ötvenes években alkotott meg, azt tételezi fel, hogy a maganyagban a nukleonok között zérus spinű mezonok közvetítik a vonzó kölcsönhatást, egyes spinűek a taszítást. Ezt a modellt számos magyar fizikus vizsgálta és fejlesztette, különösen azután, hogy a nagyteljesítményű számítógépek elérhetőek lettek. Ekkor jelent meg ugyanis a modell Walecka-féle numerikus megoldása átlagtér közelítésben. Ennek a modellnek a keretében vizsgáltuk később a pionkondenzációt, az anizotróp maganyagban létrejövő periodikus spineloszlást és a relativisztikus, anizotróp termodinamikát.

1998. *Királisan invariáns hadrodinamika Lagrange-függvénye*. Ezt a munkát (a kérdező) *Sailer Kornéllal* együtt vittük véghez. A részecskefizika Standard Modelljét ültettük át a hadronfizikára, ahol a fermionok nukleonok, a mértékbozonok zérus tömegű mezonok, amelyek később „Higgs-mechanizmussal” nyernek tömeget. Sikerenk könyveltük el, hogy idővel a Walecka-iskola is hasonló modellt publikált.

1999. *Kvantáltak-e a gravitációs hullámok?* Erre a kérdésre jelenleg sem elméleti, sem kísérleti válasz nincs. Kimutatható, hogy ha a gravitációs hullámok kvantáltak, akkor a hullám mentén a kvantumfluktuációk nem egyenletesen oszlanak el, hanem össze vannak préselve valamely tartományra (squeezing), amelyik rövidebb, mint a hullámhossz. Ez azért van, mert az Einstein-egyenletek nem lineárisak. Ha viszont a hullámok nem kvantáltak, akkor kvantumfluktuációk sincsenek, és akkor az sincs, ami össze lenne préselve. Ha a most épülő gravitációs hullám-detektorok működőképeseek lesznek, akkor nem kizárt, hogy detektálni lehessen a hullám mentén fellépő kvantumfluktuációk összehúzóerődését. Ez egy javaslat.

2002. *A kvark–gluon plazma tomografikus vizsgálata vektormezonok segítségével*. A 2005. év legnagyobb szenzációja a fizikában az volt, hogy a Brookhavenben működő Relativistic Heavy Ion Collider segítségével nagyener-

giás aranyionokat ütköztettek, és megfigyelték, hogy az ütközés során egy olyan, eddig még meg nem figyelt anyagfajta képződik, amelyik a nagyenergiás hadroncsóvakat (jeteket) teljes mértékben elnyeli. Megállapították, hogy ez az anyag az előzetes várakozással ellentétben nem alig kölcsönható plazma, hanem nagyon intenzíven kölcsönható folyadék, amelynél a sűrűdés rendkívül kis mértékű. Az idézett tomográfiai módszert még nem alkalmazták, de ennek lehetősége fennáll nemcsak a feltételezett plazma esetére, hanem a ténylegesen megfigyelt ideális folyadék esetére is.

Ha vagy kísérleti, vagy elméleti fizikus lettem volna, akkor valószínű, hogy szakmai ismereteim alaposabbak lettek volna, és ennek arányában, illetve ennek következtében a munkáim mélysége és vele a tudományos értéke is nagyobb lehetett volna. Az életem azonban nem lett volna olyan változatos. Ezért nem bántam meg, hogy csak fizikus lettem, ha egyáltalán megérdemlem ezt a titulust.

– *A Debreceni Egyetemen, illetve annak jogelődjén a Kossuth Lajos Tudományegyetemen bosszú évtizedek óta tanítod a hallgatókat. Mennyi ideje is ennek? Mi volt az oka annak, hogy egy budapesti intézet kutatójaként rendszeresen kezdted járni vidékre tanítani? Ez akkor nem volt általános szokás. Ma már többen csinálják. Az Elméleti Fizikai Tanszék vezetője is voltál, és most emeritus professzorként tevékenykedsz a tanszéken. Hogyan értékeled debreceni munkásságod?*

– Először is az utolsó kérdést háritom el. Nem az én tisztetem értékelni a saját munkámat. Azt viszont szívesen elmondom, hogy miért járok oly régóta Debrecenbe.

Egyszer *Csikai Gyula*, a Kísérleti Fizika frissen kinevezett tanszékvezetője felhívott és megkérdezte, hogy volna-e kedvem elvállalni egy félévre a magfizika tanítását Debrecenben. Elég, ha minden második héten megyek és két előadást tartok. Szinte gondolkodás nélkül rávágtam az igent. Hiszen Debrecenhez, ahogy már elmondtam, csupa jó emlék kapcsol, kivéve azt, hogy 1956-ban hűtlenül elhagytam. A hallgatókkal sikerült a közös hullámhosszt megtalálni, a régi barátok szívesen fogadtak, és lettek újak is. Körülnéztem a Kísérleti Fizika, meg az ATOMKI laborjaiban, és azt tapasztaltam, hogy a lokálpatriotizmus csodát művelt. Az itteniek felépítettek egy darab Európát. Ekkor bevallottam magamnak, hogy 1956-ban a Petőfi-körök és a reaktor vonzásához még hozzájárult egy adag taszítás is, a kishitűség. Nem voltam arról meggyőződve, hogy az Alföld közepén tényleg lehet európai színvonalú magfizikai kutatást folytatni. Aztán amikor láttam, hogy ez lehetséges, lelkiismeretfurdalás fogott el. Mái is ez az egyik érzés, ami Debrecenhez vonz. A másik nagyon pozitív hatás a hallgatóktól származott. Még sokkal romatlanabbak, mint a fővárosiak. Érződik rajtuk a vidék egészségesebb erkölcs, a földműves nagyanyák kötelességtudása és emberszeretete. Ugyanezt érzem Nagyváradon és Kolozsváron is. A hallgatók nem tekintik kötelezőnek, hogy a legrongyosabb farmerben jöjjenek szigorlatozni, vagy államvizsgázni. A neoliberalizmus romboló szelleme lassabban ér ide, de sajnos közeledik. A fizika iránti érdeklődés sajnos rohamosan csökken. No de ne panaszkodjunk, mert számos országa van a Földnek, amelynek polgárai szívesen cserélnének velünk.



Fotó: Kármán Tamás

– *Kutatás, egyetemi oktatás nemzetközi kapcsolatokat nélkül elképzelhetetlen. Mit emelnél ki ezek közül? Mi volt a meghatározó a kutatói, illetve oktatói pályád szempontjából?*

– Koppenhága után még most is honvágyat érzek. A koppenhágai Bohr Intézet számomra olyan, mint egy katolikus számára a római San Pietro. A tanszék, de bátran mondhatom, hogy az egész magyar magfizikus közösség szempontjából Frankfurt volt a legfontosabb, közelebből *Walter Greiner* személye. Nagyváradon, Kolozsváron és Marosvásárhelyen mindig otthon éreztem magam. Magyarul adhattam elő, vagy azért, mert értették, vagy azért, mert románra fordították. Akik fordítás nélkül is nevettek a tréfáimon, azokról mindjárt tudhattam, hogy milyen nemzetiségűek. Ungvár is sok szállal kapcsolódik a debreceni fizikához. Nagy örömemre szolgál, hogy a genfi CERN-hez, illetve a brookhaveni RHIC-hez is kiépült a kapcsolat. *Hatvani Istvánt* Debrecenből az eklézsia küldte Helvétiaiba teológiát tanulni, de később levélben értesítették, hogy fizikát is kellene majd tanítani a kollégiumban, ezért elment Hollandiaiba fizikát tanulni. Nem kellett hozzá központi párt- és állami szervektől engedélyt kérnie. Ma, kétszázötven évvel később újra ez a helyzet. A mostani doktoranduszoktól a fiatalságukon kívül a leginkább ezt irigylem.

– *Emlékszem, úgy adtad át nekem a tanszéket, mint megbízott helyettesednek, hogy Rád „nagy” feladat vár: a Központi Fizikai Kutató Intézet igazgatása. Szokatlan vállalkozás olyasvalakitől, aki igyekezett idejét a kutatásnak és az oktatásnak szentelni. Miért vállalkoztál erre a feladatra? Megérte?*

– Meg! Mielőtt Debrecenbe jöttem, öt évig voltam a KFKI tudományos tanácsának elnöke, ezért pontosan ismertem azokat a gondokat, amelyek a vasfüggöny eltűnésével együtt szakadtak rá a KFKI-ra 1990-ben. Azt is tudtam, hogy a KFKI kutatói önálló kutatóintézeteket szeretnének, amelyek kialakíthatják a saját kutatási irányuknak megfelelő értékrendet. Erre készítettem egy tervet és azt beadtam az Akadémiához. A kutatók szavazataikkal megerősítették a tervet, a főtitkár pedig másfél évre megbízott a főigazgatói teendőik ellátásával. Hogy nem a magam elgondolását valósítottam meg, hanem a KFKI kutatóiét, az abból látszik, hogy 15 éve minden baj nélkül működik az akkor definiált rendszer. Számomra nem a főigazgatóság volt a vonzó, hanem a feladat, amit másfél év után nem is kellett átadnom senkinek, mert azóta sincs főigazgató, én voltam az utolsó.

– *Változó történelmi időkét éltél meg, világháború, '56, '68, rendszerváltás, hogy csak néhány történelmi fordulót említsék. Hogy tudtál ezekben az időkben eligazodni?*

– Azt meg kell hagyni, hogy változatos volt körülöttem az élet. Az volt a szerencsém, hogy 1945-ben még csak 14 éves voltam, ezért sem katonának nem vittek el, sem a szovjet rendszer nem tarthatott igényt szolgálataimra. Mire „felnöttem”, volt időm, hogy eligazodjam a „történelemben”. Szemem láttára bukkott meg az egyik diktatúra, és szakadt ránk egy másik. Nem volt nehéz felismerni, hogy a magyar nemzet hagyományai, a magyar nép keresztény világnézete az, amire az életemet alapozhatom. Politikai felfogásomat és világnézetemet Veres Péter, Illyés Gyula, Németh László és a keresztény erkölcsi tanítás együtt határozta meg. Semmi sem kényszerített rá, hogy hozzájuk hűtlen legyek. Azt viszont tudom, hogy ez nem az én érdemem, hanem az Isten ajándéka, mert nem kerültem soha életveszélyes kényszerek hatása alá.

– *Mit üzennél egy hosszú és eredményes kutatói és oktatói életpályá tapasztalatai alapján azoknak az egyetemi hallgatóknak, akik a jövő fizikatanárai, illetve kutató fizikusai lesznek?*

– Azt üzenem, hogy a fizika nem egy a legérdekesebb tudományok közül, hanem a legérdekesebb. Ezt megkíséreltem bizonyítani. A fizika módszertana a következő lépésekből áll:

1.) Fogalomalkotás:

A fizikai fogalmakat mérési utasításokkal definiáljuk, következésképp számszerű jelentést tulajdonítunk nekik (ilyen például két pont távolsága, vagy két esemény közti időkülönbség). Ezután felkutatjuk azokat a fogalmakat, illetve azon matematikai összefüggéseket, amelyek már a korábbi definíciókból következnek (ilyen például a sebesség, vagy a gyorsulás).

2.) Megfigyelés:

A bennünket körülvevő világból tanulmányozás céljából kiválasztunk egy részrendszert, amelyet gondosan megfigyelünk (ilyen például a Naprendszer). A nyert tapasztalatok alapján méréseket végzünk a fent definiált mérési utasításoknak megfelelően.

3.) A körülmények figyelembevétele:

Feltételezzük, hogy a vizsgálat tárgyának kiválasztott rendszert a külvilág csak elhanyagolható mértékben zavarja (ilyen például a Naprendszer). Ha ez nem igaz,

akkor vagy megkíséreljük a külső zavart csökkenteni, vagy ha ez nem lehetséges, akkor módszert keresünk a külső zavar megbecslésére.

4.) Modellalkotás:

A rendszert részeire bontjuk. Megkíséreljük megadni az egyes részek leírását (a Naprendszer esetén feltételezzük, hogy minden egyes bolygó egy-egy tömegponttal modellezhető), majd figyelembe vesszük az alkatrészek közötti kölcsönhatást (feltételezzük, hogy a Nap és a bolygók páronként hatnak egymásra).

5.) Törvényalkotás: Ehhez intuíció kell!

(A Naprendszer esetén – Newton zseniális elgondolását követve – feltételezzük, hogy a Nap és bármely bolygó, illetve két tetszőleges bolygó között ugyanolyan alakú gravitációs törvény érvényes, amely a tömegek szorzatával arányos és fordítva arányos a távolság négyzetével.)

6.) A törvény matematikai formában való megfogalmazása (a Naprendszer esetén csatolt differenciálegyenlet-rendszer formájában).

7.) A matematikai egyenletek megoldása.

8.) A matematikai megoldás és a megfigyelések számszerű összehasonlítása.

9.) Ha szükséges, akkor a törvény feltételezett alakjának módosítása.

10.) Amennyiben a megfigyelés és a matematikai leírás kielégítő egyezést mutat, akkor az elmélet alapján eddig meg nem figyelt új jelenség előrejelzése.

11.) A matematikailag előrejelzett eredmény ellenőrzése megfigyelések segítségével.

12.) Az elmélet és a megfigyelés között tapasztalt finom különbségek magyarázatára új elmélet megalkotása (ilyen volt az általános relativitáselmélet bevezetése).

13.) Az új elmélet ellenőrzése az új megfigyelések segítségével,

14.) és így tovább.

Ez a módszertan egyesíti a matematikai gondolkodás tiszta egzaktágát a valóság megfigyelésének változatosságával és gazdagságával. Mindezt teszi a gondolat szabad szárnyalásával, amelyet a tények nem gúzsba kötnék, hanem a soha nem vélt finom részletek felé terelnek. Röviden: a matematikai pontosság és a valóság a fizikában találkozik a legszebben. Ha valamit nem lehet a matematika eszközeivel világosan leírni, azt kihagyjuk a fizikából. (Talán majd később visszatérünk rá.) A fizikában betartjuk *Wittgenstein* híres ajánlását: „Ha valamiről lehet beszélni, akkor beszéljünk világosan, ha ezt nem lehet, akkor inkább hallgassunk.”

Ezért hiszem azt, hogy a fizika a legérdekesebb és a legszebb tudomány. A fenti módszertan végigkövetése a Naprendszer leírása vonatkozásában több, mint két évezredet vett igénybe, de mindvégig szép és érdekes maradt.

Áldom az Úristen nevét, mert megengedte, hogy a 20. századból, azaz a fizika századából pontosan egy félévszázadot foglalkozhattam fizikával, miközben megértem két gonosz diktatúrának, a náciizmusnak és a bolsevizmusnak a bukását.

– *Tisztelt Professzor Úr, kedves „Bátyó”, ezúton is köszönöm a beszélgetést és kívánok a Fizikai Szemle olvasótáborára és a magam nevében is boldog születésnapot.*

Sailer Kornél

MOST LENNE 60 ÉVES

– megemlékezés Ferenczi Györgyről (1946–1993)

Az út üres, de működését abba sose hagyja.

Lao-ce: Tao Te King

Weöres Sándor fordítása

Azok a faxgépek, amelyek addig *Ferenczi György* környezetéből izgalmas félvezető-fizikai kérdéseket tárgyaló írásokat, kereskedelmi ajánlatokat, üzletkötési dokumentumokat, érkezési és indulási adatokat, sikereket kommunikáltak – 1993. február 15-én mindenki számára hihetetlen és felfoghatatlan hírt adtak a világ több, mint harminc országába, azt, hogy a mindössze 47 éves sikeres kutató és üzletember nincs többé.

Előttem került a MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetébe (MTA MFKI, népszerű nevén MŰFI). A félvezetőkkal kapcsolatos kutatásokat ott akkor *Szigeti György* akadémikus, az intézet igazgatója és *Szép Iván* tudományos igazgatóhelyettes vezették. A félvezetőkkal foglalkozó kutatók csoportját összefogó osztályt *Gergely György* irányította. A csoport fokozatosan bővült, így később három új egységre osztották. Ferenczi Gyuri a Sugárzásos Jelenségek Osztályára került (vezette *Lendvay Ödön*), én a Tömbeffektusok Osztályán (vezette *Beleznay Ferenc*) dolgoztam. Az osztályok ekkor még nem voltak várak, igen élénk kommunikációban teltek napjaink, sokféle adottságú és képzettségű kolléga ekkor kezdte meg azt a sikeres kutatási, fejlesztési, kísérleti gyártási tevékenységet, amely hazánkban a vegyület-félvezető anyagok és eszközök kutatását jelentette. A tudománypolitika – már akkori is – egyre inkább érdeklődött a kutatási eredmények hasznosulása iránt. Ez hazai hasznosulást jelentett általában, és keresni kellett azokat a területeket, amelyeket a COCOM-listák korában lehetett, érdemes volt művelni. Az elszigeteltség áttörése csak tehetséggel és kitarással egyaránt megáldott embereknek sikerült, esetenként némi szerencsével.

Persze, azért így is lehetett szép sikereket elérni. Ezek ízt Gyuri már az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának fizikus szakán megismerte, ahol az Országos Tudományos Diákköri Konferencián kiemelt miniszteri dicséretben részesült. Lételeme volt a verseny, a megmérettetés. Az MTA MFKI-ba 1970-ben került, ahol rövid elméleti munka után félvezető eszközök minősítő berendezéseinek kidolgozásával bízták meg. Ezek a munkák első gyümölcsüket 1976-ra hozták meg, ekkor kötött az Intézet kutatási szerződést az egykori NDK-beli Werk für Fernsehelektronik gyárral. Kutatásai során a világító diódák degradációját tanulmányozva azonosította a sajtóhibák és vakanciák szerepét. Érdekes eredményeket kapott a szilíciumra is, itt négy nagyságrenddel megnövelte a szénszennyezés koncentrációjának kimutathatósági határát. Ezeknek az eredményeknek máig ható szerepük van az általa kifejlesztett készülékek és elvek piaci sikerében. Igen fiatalon, 1977-ben, a fizikai tudomány kandidátusa lett.

1981-ben megszervezte a Félvezető Spektroszkópiai Osztályt, amely a félvezető *mélynívő-spektroszkópia* böl-

csője lett. A mélynívők tranziens spektroszkópiájának elvét több ponton továbbfejlesztette, és először tette kereskedelmi forgalomba hozható műszer alapelvévé. A kifejlesztett mélynívő-spektrométer gyártására és értékesítésére az MFKI és a RADELKIS Ipari Szövetkezet gazdasági társulást hozott létre. Ez sikeresen működött, és 1983–86 között az MTA legnagyobb nyugati devizában elért árbevételét jelentette. Ez a gazdasági társulás új forma volt akkor, mint annyi minden, amikor kutatási eredményeinek hasznosításával foglalkozott [1].

A következő évben felismerte a *mikrobullámú abszorpciós spektroszkópia* elvét. Ennek licencét egy nyugatnémet cég vette meg, amely a berendezés prototípusának kidolgozásával is megbízta az MFKI-t. E projekt megvalósításában az általam vezetett Mikrohullámú Eszközök Főosztály munkatársaival én is részt vettem. Élmény volt, még akkor is, ha a fejlesztés természetesen nem volt eseménytelen. Más-más oldalról szemléltük a problémákat, ezért is volt, hogy rendre egymást kiegészítő megoldásokat találtunk [2]. Mindketten rendszeresen későig az intézetben voltunk, ekkor tudtunk egy-egy szakmai problémában a legjobban elmélyedni.

Mérési módszereit folyamatosan fejlesztette, így 1987-ben bevezette az *elektrolitikus konduktancia mérés* elvét. A felismert, továbbfejlesztett elvek gyakorlati megvalósítására 1989-ben megalakította a SEMILAB Rt.-t. Ekkor még friss volt hazánkban a társasági törvény, ez is egy régi-új formának számított akkor.

Érdekes röviden kitérnünk Ferenczi György innovációval kapcsolatos nézeteire is. Ezeket a nézeteket a teljes pragmatizmus jellemezte. Őt, és e sorok íróját is, sokan régi kollégáink közül mergelőnek tartották, azaz olyanoknak, aki ismert elemeket csoportosít át, s ezekből nyeri a hasznát és az előnyöket. Magamról itt nem szólnék, de Ferenczi esetében nyugodtan megállapíthatjuk, hogy tevékenységét inkább az eredeti gondolatai megvalósításához szükséges további elemek összegyűjtése jellemezte. Igaza volt – ma is az lenne –, hogy nem vesztegette idejét már feltalált dolgok újrafelfedezésére.

Neki is köszönhetően az akkori MFKI-nak igen jó nemzetközi kapcsolatai voltak. Kiemeljük a Lundi Egyetemmel (Svédország) való kapcsolatot, ahol *P. Weisglass*, valamint *H.G. Grimmeiss* professzor, az IBM-nél *S.T. Pantelides*, a Thomson–CSF-nél *A. Nickle*, a London College-ban *A. Stradling* voltak a legfontosabb partnereink [1]. Gyakori vendég volt nálunk *Jerzy M. Langer* a Lengyel Tudományos Akadémia Fizikai Intézetéből, *M.K. Sheinkman* az Ukrán Tudományos Akadémia Félvezető Fizikai Intézetéből. Nagy örömünkre Hermann Grimmeiss professzor ma is aktív, az ő emlékező sorait olvashatják a következő írásban.

Ferenczi György aktív résztvevője volt igen sok hazai és nemzetközi konferenciának. Lényéhez tartozott a kommunikáció, nyelvismerete, emberi kvalitásai igen alkalmassá tették őt az ilyen fórumokon való szereplésre. Az általa szervezett rendezvények közül kiemeljük a *New Developments in Semiconductor Physics* című Nyári Iskolát, 1979-ben és 1987-ben Szegeden, és a nagy nemzetközi visszhangot kiváltott *Defects in Semiconductors* című konferenciát 1988-ban, Budapesten. Svéd kapcsolatai révén részt vett a *Lund Konferencia*-sorozat szervezésében is.

Igen sok előadást tartott ezeken a rendezvényeken. Számomra különlegesen emlékezetes az 1983-ban Egerben megrendezett IV. Lund Konferencián és a lengyelországi Jasowieczen megrendezett nemzetközi konferencián a mélynívókról, illetve a mélynívók spektroszkópiájáról tartott előadása. Ez idő tájt nincs is olyan év, hogy ne vett volna részt néhány nemzetközi konferencián. A mélynívók spektroszkópiájának új módszerét jelentő mikrohullámú abszorpciós spektroszkópia módszerről 1986-ban Párizsban beszélt először. Ugyanitt tartott előadást a szilíciumban lévő szén szerepéről is.

Jó, később is sikeres csapatot gyűjtött maga köré. Publikációi között fontos helyet foglalnak el szabadalmi, amelyekkel nagyon szeretett foglalkozni. Ebben *Nagy Elemér* akadémikusban, az Intézet későbbi igazgatójában igen hatékony, értő segítőt talált.

Az Eötvös Társulat Félvezető Fizikai Szakcsoportja Ferenczi Györgyöt és *Boda Jánost* az MTA MFKI, továbbá *Horváth Pétert* az MTA KFKI munkatársát 1987 júniusában Állami Díjra javasolta. A felterjesztés a mélynívó spektrométer megalkotását, az alapkutatásban elért kiemelkedő eredményektől a világpiacon első műszer üzemi gyártásának megszervezéséig terjedő átfogó munkásságot emelte ki. A felterjesztés eredményeként a kollektíva Állami Díjban részesült.



Az 1987-ben Állami Díjat kapott csoport: Horváth Péter, Ferenczi György és Boda János.

Mi történt azóta?

A életút 1993-ban tragikusan megszakadt, de a termékeny élet gyümölcsei tovább élnek. A biztos alapkutatási eredményekre épülő gyártmányok stabilan néznek szembe a későbbi kihívásokkal is. A Ferenczi György és munkatársai által kifejlesztett mélynívó spektrométert további módszerek kifejlesztése követte. Az ismeretek hasznosítására alapított SEMILAB Rt. újabb piacképes termékeket hozott létre.

A nagy tanulsága ennek az életútnak számomra az, hogy igazán jelentős sikert csak eredeti ötletek eredményes kimunkálásával és sikeres marketinggel lehet elérni. A piaci siker ekkor sem garantált, de nagy a valószínűsége, hogy bekövetkezik.

Mojzes Imre, BME

Irodalom

1. GYULAI J.: Nyugati kapcsolatok, In: *Fejezetek a magyar mikroelektronika történetéből* (szerk.: Mojzes I.) – Alapítvány a Mikroelektronikai Műszaki Tudományos Kultúráért, Budapest, 2001. ISBN 963 008434 1
2. MOJZES I.: A mikrohullámú félvezető eszközök kutatása és alkalmazása az MTA Műszaki Fizikai Kutató Intézetben és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. In: *A magyar elektronikai ipar – múlt és jelen* – Műegyetemi Kiadó, Budapest 2004. ISBN 963 420827 4

HOMMAGE À FERENCZI GYÖRGY

– tisztelgés Ferenczi György emléke előtt

A 70-es évek végén találkoztam először *Ferenczi György*-gyel, amikor a Svéd Királyi Tudományos Akadémia cse-reprogramja keretében meglátogattott bennünket Lundban. Mi mindannyian mélynívók elektromos és optikai tulajdonságait tanulmányoztuk félvezetőkben, akkoriban ez általános érdeklődés tárgya volt. Habár a mélynívók

tanulmányozása már évek óta folyt különböző félvezető anyagokban, a 70-es évek közepére fokozódott az érdeklődés a téma iránt, *David Lang* úttörő munkájának, a Mélynívó Tranziens Spektroszkópiának (DLTS) köszönhetően. Annak ellenére, hogy a DLTS nem volt egy kifejlesztett spektroszkópiai eljárás, mégis megkönnyítette, hogy a hibakoncentrációról elfogadható pontossággal mennyiségi információt nyerjünk, és közvetlenül mérni

Nagy Hildegard fordítása

tudjunk elektromos paramétereket, mint emisszió és befogási hányados. Amint ezek a paraméterek ismertek, a hiba energiahelyzete a tilos sávon belül meghatározható entalpia energianívókkal, Gibbs szabadenergiát és/vagy küszöbenergiákat levezetve az egyszerű optikai keresztmetszet-eloszlásból. Ezek a mérési módszerek általános értelemben kétségkívül fontos áttörést jelentettek a félvezető hibahelyek jellemzésében.

Bár David Lang DLTS mérési technikájának elvét széles körben alkalmazták, mind a lundi csoport, mind Ferenczi György Budapesten, *Tony Peaker* Manchesterben kifejlesztett egy DLTS mérés technika változatot. Ez volt az egyik indíték, amiért Ferenczi György gyakran felkereste Lundot, hogy megbeszéljük és megvizsgáljuk a létező technikák új alternatíváit, mely végül az ő részéről egy saját cég létrehozását, és közöttünk mély barátság kialakulását eredményezték.

Ferenczi György nagyon barátságos és kedves ember volt. A Tanszéken mindenki örömmel dolgozott vele, nemcsak a kollégák és a csoport más tagjai, de a technikai személyzet is. Amellett, hogy nagyon erős elméleti tudással rendelkezett, nagyon gyakorlott kísérletező is volt, aki mindig a helyes kérdést tette fel. Nagyon tehetséges fizikust ismertem meg benne, aki hatékonyságával gyakran előbb ért egy feladat végére, mint legtöbbször.

Ferenczi György keményen dolgozó, kezdeményező egyénisége nagyon jól észlelte egy-egy projekt célját, és hogy azt hogyan oldhatná meg gyorsan és hatékonyan. Ez a rendkívül találékony, kreatív és megoldásközpontú személyiség gyakran állt elő új és új ötletekkel és megoldásokkal projektjein való munkálkodása során.

Tudományos adottságain felül nagyon ügyes üzletember is volt. Azzal a ritka képességgel bírt, hogy azonnal

látta egy tudományos eredmény kereskedelmi értékét, és azt, hogy ezt az eredményt hogyan lehet hasznosítani, és kereskedelmi termékekbe áthelyezni. Tekintve, hogy Ferenczi György üzleti tevékenységét még a hidegháború idején kezdte, és nem talált mindig országa politikai vezetőségének egyetértésére, csodálni való, hogy cége milyen gyorsan fejlődött. A tudományos gyakorlat, a kereskedelem iránti érdeklődés, és egy bizonyos altruista magatartás kombinációja kiváló üzletemberré tette.

Egy másik tulajdonsága, melyet jól ismertünk, és valamennyien értékeltünk, vendégszeretete volt. Valahányszor meglátogattuk Budapesten, meghívott bennünket a legjobb éttermekbe, ahol a legkitűnőbb ételeket és borokat élvezhettük legnagyobb örömünkre. Ezzel szemben Ő mindig nagyon szerény és igénytelen volt, amikor meglátogatott bennünket. Soha nem várt el megkülönböztetett bánásmódot – mi azért igyekeztünk tartózkodását a lehető legkellemesebbé tenni.

Ferenczi György később több nemzetközi konferenciát szervezett kollégáival együtt Magyarországon, melyeket nagyra értékeltünk. Ezeket a konferenciákat Budapesten kívül rendezte, lélegzetelállító helyeken, mint Szeged vagy Eger, és így a tudományos programmal kombinálva lehetőséget nyújtott nekünk résztvevőknek, hogy sokat tanuljunk az országról és az ottani szokásokról.

Valóban gyönyörű idő volt ez, és Ferenczi Györgynek köszönhetően sokan kötöttünk életre szóló barátságot. Ezért voltunk nagyon szomorúak, amikor megtudtuk, hogy ilyen gyorsan, és ilyen nagyon korán elhagyott bennünket. Hiányozni fog nekünk – de mindig velünk lesz.

Lund, 2006. július 31.

Hermann G. Grimmeiss
Lundi Egyetem, Svédország

A FIZIKA TANÍTÁSA

GYORSAN BEMUTATHATÓ FOUCAULT-INGA KÍSÉRLET

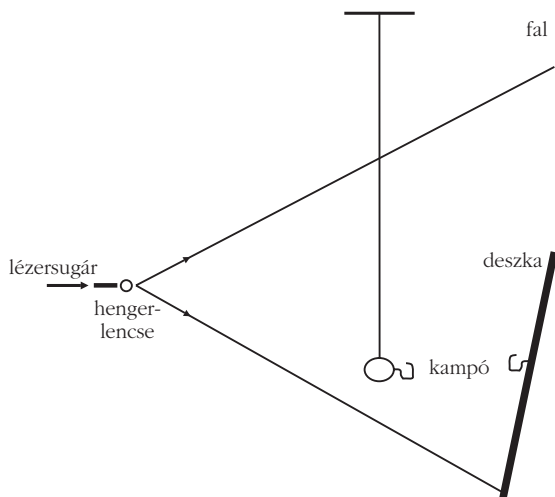
Gyarmati Csaba

Radnóti Miklós Gimnázium, Dunakeszi

A Foucault-ingás kísérletet még a kísérletező hajlamú fizikatanárok sem szokták szívesen és gyakran mutogatni. A kísérlet „hagyományos” bemutatásánál hosszú (legalább 10 m), nagytömegű ingát szokás használni, amely lengési síkjának elfordulása során az útjába helyezett kis bábukat felborítja, vagy az ingára szerelt tű a talajra szórt homokba vonalakat karcol. A hosszú, nagytömegű ingára a kis csillapítás végett van szükség, mert az inga lengési síkjának még kis elfordulásához is elég sokat kell várni, és eközben a lengések amplitúdója nem csökkenhet számottevően. Ezért aztán a kísérlet akárhol, például egy normál osztályteremben, be sem mutatható. (Viszont vitathatatlan bája van egy nagy ingával bemutatott kísérletnek.)

Ha sikerül olyan módszert találni az inga lengési síkja elfordulásának kimutatására, amellyel már egészen parányi elfordulást is érzékelhetővé lehet tenni, akkor nincs szükség a hosszú, kis csillapítású ingára, egy „közönséges” plafonról lelógó inga is megteszi. Erről lesz szó az alábbiakban.

A lengési sík elfordulását egy hengerlencsével szétterített lézernyalábbal is ki tudjuk mutatni. Erre alkalmas eszköz, amelynek még a hengerlencse is tartozéka, lézeres vízszintező néven néhány ezer forintért kapható a barkácsboltokban. (Mellesleg az eszközt jól használhatjuk az optikai kísérleteknél is.) Ez a szétterített lézernyaláb meghatároz egy síkot. Úgy kell beállítani a lézert és

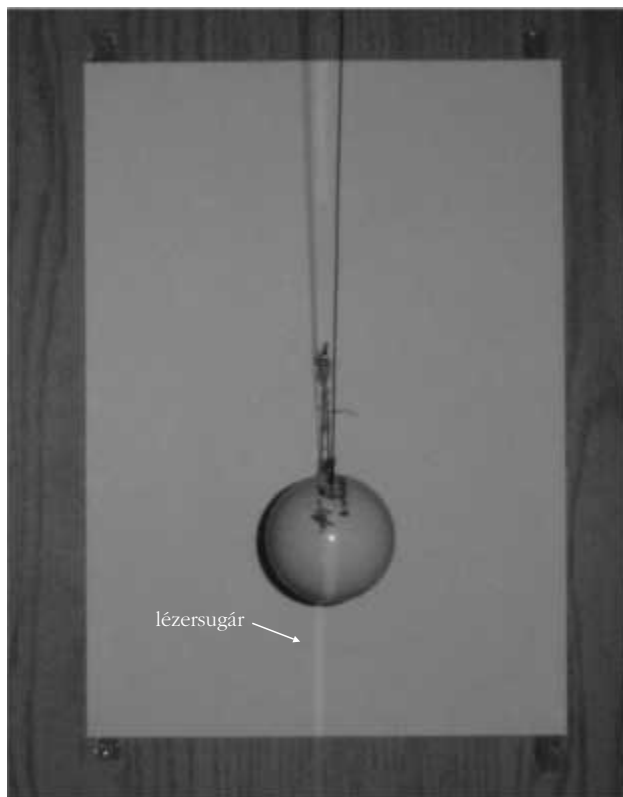


1. ábra. A lézeres Foucault-inga elvi rajza.

az ingát, hogy az inga kezdeti lengési síkja egybeessen a lézernyaláb síkjával. A beállítást az 1. ábra szemlélteti.

A lézer fénye a falon függőleges szakasznak látszik. Úgy kell beállítani a lézert, hogy a lézercsík a nyugalomban lévő inga közepén haladjon át, valamint a falnál lévő kampót is megvilágítsa. Ezt úgy lehet egyszerűen elérni, hogy a falnál lévő kampót egy deszkába fúrjuk, és a deszkát úgy mozgatjuk (támasztjuk a falnak), hogy a lézercsík a kampón menjen át. (Ezt a kampót érdemes úgy beállítani, hogy a kikötött ingatest súlypontja

3. ábra. A nyugvó inga indítása a rögzítő fonal elégetésével.



2. ábra. Az inga indítási állapota: a kitérés síkja egybeesik a lézernyaláb síkjával, mely az ingatest közepét metszi.

magasságába kerüljön.) A beállítás után az ingát kitérítjük, és a két kampót egy rövid zsinórral összekötjük. Megvárjuk, amíg az inga megnyugszik a szélső helyzetben (2. ábra). Ha szükséges, korrigálunk a deszka helyzetén, hogy a lézercsík most is az ingatest közepén ha-

4. ábra. Cardano-féle felfüggesztés két darab alátét segítségével.



ladjon át. Ha minden rendben, a zsinórt elégetjük (3. *ábra*). Az első lengésnél az inga úgy mozog, hogy a lézercsík az ingatest közepén halad át. Már néhány lengés után látszik, hogy a lézercsík az egyik szélső helyzetben az inga közepétől egy kicsit jobbra, a másik szélső helyzetben pedig egy kicsit balra világítja meg az ingát, vagyis az inga lengési síkja elfordult. A lézercsík 1 mm-es eltolódását már nagyon jól lehet érzékelni. Ez az inga körülbelül 0,5 m amplitúdója esetén 2/1000 radián elfordulást jelent, amire nem egészen 40 másodpercet kell csak várni. Ilyen rövid idő alatt a legegyszerűbben kivitelezett inga sem csillapodik észrevehető mértékben.

Néhány gyakorlati tanács

Ezt a kísérletet viszonylag igénytelen eszközökkel is gyorsan be lehet mutatni – a legtöbbet a szabadon lógó, illetve kikötött inga megnyugvására kell várni –, de ennek is megvan a buktatója. Az inga fonalát célszerű valamilyen fémhuzalból készíteni. A textílfonalakban mindig marad vagy keletkezik valamilyen csavaró fe-

szültség, amely az ingatest forgását eredményezi. Valószínű, hogy a forgási rezgés képes csatolni az inga lengési módusait. Tény, hogy az inga hamarosan a kezdeti lengési síkjára merőleges síkban is lengésbe jön. Ez, sajnos, jól érzékelhető, és erősen rontja a kísérlet meggyőző erejét. Fémhuzalt használva különösen fontos, hogy az inga felfüggesztésénél ne legyen kitüntetett lengési irány, vagyis az inga vagy egy tű hegyén keresztül, vagy két egymásra merőleges éken keresztül támaszkodjon a plafonon lévő tartóra. Ez utóbbi (Cardano-féle) felfüggesztés viszonylag egyszerűen megoldható két darab (8-as) alátét segítségével (4. *ábra*). Az alátétek belső peremét egy nagyobb, például 10-es, fűrésszel és élesre fűrjük. (Ezek lesznek az ékek.) Mindkét alátét sugárirányban a pereménél egy kicsit befűrészeltük, majd a fűrészelésnél a két alátétet összetoljuk, és összeragasztjuk vagy összeforrasztjuk. Így a két alátét egymásra merőleges lesz. Az egyik alátétet a plafonba csavart kampóra akasztjuk, a másikba pedig az inga huzalának végére forrasztott kampót akasztjuk. Az inga testét én egy biliárdgolyóból készítettem, az inga fonala pedig 0,8 mm átmérőjű rézhuzal volt.

CSODATORONY SZEGEDEN

Szeged város egyik építészeti büszkesége, az „Öreg Hölg”, az ország legidősebb, vasbetonból készült víztornya (1904-ben a Szent István téren), az EU támogatásával több, mint 1 Mrd Ft befektetés árán gyönyörűen megújult (1. *ábra*). Az építészeti csoda és a környező tér igazán nagyszerű látvány, de az igazi csoda a toronyban van.

Az ELFT Csongrád megyei Csoportja, amikor hírt vette a felújítási szándéknak, ügyes és kitaró lobbizással elérte, hogy az Egyetem, a város és a Vízmű támogassák a gondolatot: létesüljön a toronyban fizika- és technikatörténeti kiállítás interaktív oktatási lehetőséggel, s egyebek között legyen bemutatva egy Foucault-inga is.

Mivel az ötlet megvalósításában néhány önzetlen támogató segítségével kívül másra nemigen számíhattunk, a megoldás kulcsa az egyetemi tanszékek és iskolákban dolgozó kollégák összefogása volt.

A szegedi iskolák és egyetemi intézmények gazdag szertárral rendelkeznek, s eszközeik között sok olyan akadt, amely muzeális értékű, de gondosan karbantartott és működőképes. Kollégáink szívós és önzetlen munkával – a „csak az reménykedhet a jövőben, aki megadja a tiszteletet a múltnak” gondolat szellemében – először összegyűjtötték, rendszerezték a „kincseket”, majd a látogatók számára magyarázó ábrákkal és szövegekkel látták el.

Az eszközök üvegfalú tárlókban a víztorony hetedik szintjén kaptak helyet (2. és 3. *ábra*). Mobil székekkel, asztalokkal interaktív bemutatóra alkalmas terület is létesült, ahol „rendhagyó, kihelyezett” fizikaórákat lehet tartani kicsiknek, nagyoknak egyaránt.

1. *ábra*. Magyarország első vasbeton víztornya (fotó: Becker Ottó).





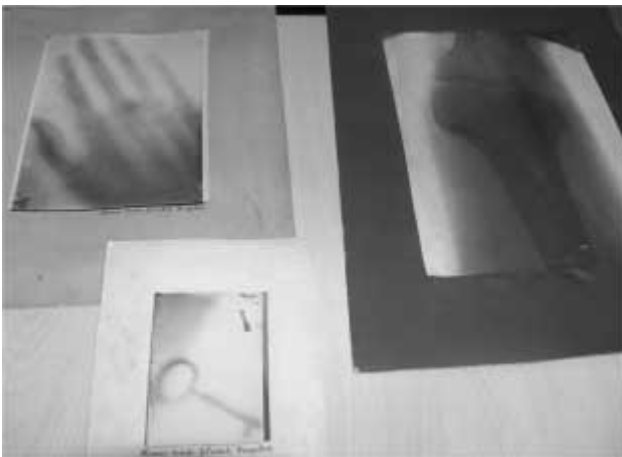
2. ábra. A hetedik szint a fizika- és technikatörténeti kiállításé.



3. ábra. A muzeális eszközök egyaránt vonzanak kicsiket és nagyokat.

A kiállított eszközök száma több, mint száz, nagy részük a tizenkilencedik században, illetve a huszadik század elején készült (4. ábra). Helyi különlegességek is szerepelnek a korabeli katalógusokból azonosított eszközök között. Például *Homor István* szegedi fizikatanár röntgenfelvételei (5. ábra), amelyeket 1896 januárjában(!) – *Röntgen* cikke 1895 decemberében jelent meg – mutatott be Szeged polgárainak, vagy az 1916-ból

5. ábra. Homor István szegedi fizikatanár röntgenfelvételei 1896(!) januárjából.



4. ábra. A tárlókban a múlt század eleji fizikatanítás eszközei.

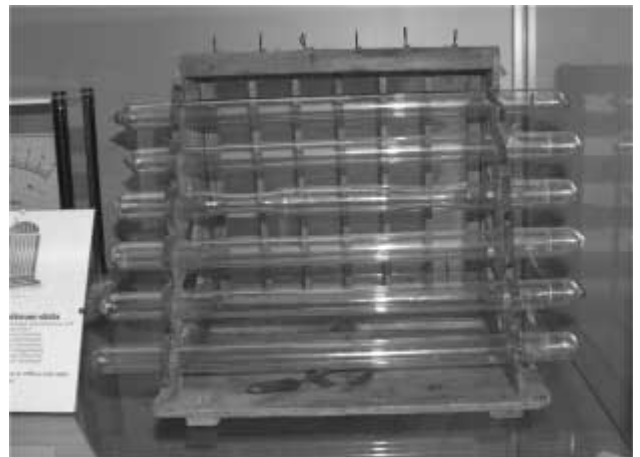
Hellmann Oszkár szegedi mester készítette kisüléscső-sorozat (6. ábra).

Kontrasztként, a jelenkori egyetemi kutatásokat is bemutatja több kiállított tábló (7. ábra).

A kiállítás kivitelezésében elvülhetetlen érdemeket szereztek társulati kollégáink, s köszönettel kell említenünk *Papp Katalin* egyetemi docens, *Molnár Miklós* nyugalmazott egyetemi docens, *Csiszár Imre* és *Békei László* középiskolai tanárkollégák nevét. A kiállítás anyagát terveink szerint rendszeresen frissítjük, az induló kiállítás tárgyai az egyetemi szertárakból, illetve a Vedres és Kőrössy szakközépiskolák anyagából kerültek ki.

A víztorony építészeti megoldása adta lehetőséget felhasználva felállítottunk egy Foucault-ingát is. A lengő gölyő fogadja az épületbe betérő vendégeket (8. ábra), míg a felfüggesztés a 6. emelet magasságában van – az inga

6. ábra. Hellmann Oszkár szegedi mester kisüléscső-sorozata (1916).





7. ábra. A Szegedi Tudományegyetemen folyó kutatásokat demonstráló táblák részlete.

„fonala” egy közel 25 m hosszú acélsodrony. Az igen nehéz és precíz munka megvalósításában a Kísérleti Fizikai Tanszék műhelye vett részt, s mind az inga, mind a kiállítás programja ügyében elvülhetetlen érdemeket szerzett Szatmári Sándor egyetemi tanár, a tanszék vezetője.

Reményeink szerint az „Öreg Hölgy” az ismeretterjesztés, a természettudományos oktatás olyan helye lesz, ahova szívesen jönnek majd kis és nagy diákok tanáraikkal együtt, hogy megtapasztalják, mennyire csodálatosan működik a természet. Talán lesz majd szegedi és nem szegedi látogató az utcáról is, aki, miután élményekkel felvértezve távozott, másképp gondol a világra, környezetére, s benne önmagára.



8. ábra. A 25 méter magasról lógó Foucault-inga.

Az „Öreg Hölgyet” a Vízmű üzemelteti. Terveik szerint havonta egy alkalommal lesz nyitva (tetején kilátó), de szervezett csoportok számára bármikor tudnak bemutatót, előadást tartani. Jelentkezés az ELFT Csongrád megyei Csoport titkáránál, Csiszár Imrénél (csiszi@sol.cc.u-szeged.hu).

Nánai László
az ELFT Csongrád megyei Csoport elnöke

HÍREK – ESEMÉNYEK

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Az alapkutatótól az innovációig

Az MTA Magfizikai Bizottsága 2006. október 5-én ülést tartott, amelyen Kiss Ádám, a Bizottság elnöke, valamint Krasznaborkay Attila, a Bizottság titkára az alábbi felhívást tette közzé:

A darmstadti GSI-ben (Gesellschaft für Schwerionenforschung) épül Európa legnagyobb nemzetközi magfizikai központja, a FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), melynek kutatásaiba a magyar tudósok számos területen be tudnának kapcsolódni. Ilyen terület például

- az antianyag-kutatás,
- a plazmafizika,
- a biofizika.

Az európai országok jelentős része felismerte, hogy az egyedülálló alapkutatói lehetőségeken túl az épülő új berendezés a gyakorlati élet szempontjából is nagyon

fontos alkalmazási feladatokat is szolgálhat. Ezért a kormányok jelentős összegekkel támogatják a kezdeményezést, és ezzel megteremtik a lehetőséget arra, hogy kutatóik-fejlesztőik teljes jogú résztvevőkként dolgozhassanak majd a kutatóközpontban.

A nehézion-kutatások már eddig is a legkülönbözőbb technológiai innovációkhoz vezettek. Ezek közül a legígéretesebb eredményeket talán a precíziós ionnyalábokkal végzett rákterápia szolgáltatja. A FAIR világviszonylatban is egyedülálló, új alkalmazásai közül néhány példa:

1. Új nyomjelzési módszerek anyagkutatások számára, vastag fémrétegekben, nagy nyomás alatt.
2. Komplette műholdas berendezések tesztelése kozmikus sugárzásra a fellövés előtt.
3. Radiobiológiai kockázati tényezők meghatározása.
4. A jövő fúziós erőműveiben keletkező plazmák tulaj-

donságainak meghatározása, nagyenergiájú és nagy teljesítményű lézerek felhasználásával.

5. Nanocsövek, nanoszálak előállításának nehézionokkal.

6. Anyagok tulajdonságainak módosítása.

A projektben való aktív részvétel a későbbiekben jó alapot biztosíthat központi EU-források sikeres megpályázására, s az így elnyert pénzt a központban folyó ma-

gyar kutatás-fejlesztési munkákra, valamint magyar vállalatok bevonására lehet fordítani. Mindezek alapján úgy látjuk, hogy hazánk csatlakozása a központ felépítéséhez nagyban segítené a hazai kutatás-fejlesztést, a fejlett technológia magyarországi elterjesztését. Ezért a magyar magfizikus közösség nevében javaslatot teszünk arra, hogy Magyarország csatlakozzék a FAIR-projekthez.

Kutatás-alkalmazás 2006 rendezvény

Az MTA Debreceni Területi Bizottsága (DAB) Fizikai Munkabizottsága a fizikai kutatási eredmények gazdasági hasznosításának előmozdítása érdekében egy olyan eszmecsere-t szervez, amelyen a kutatók és az alkalmazásban érdekeltek tizenöt-húsz perces előadás keretében elmondhatják, hogy mit kínálnak, illetve mit igényelnek egymástól. Felhívjuk figyelmét erre a lehetőségre, és kérjük, részvételével támogassa kezdeményezésünket.

A rendezvény 2006. november 15-én 14 órakor kezdődik a DAB székházban (Debrecen, Thomas Mann u. 49.). Az összejövetel programja a jelentkezések számától függ, melyet egy későbbi levelünkben megküldünk.

Kérjük a kollégákat, vegyenek részt a találkozón, jelentkezésüket november 10-ig várjuk a csik@atomki.hu e-mail címen.

A DAB Fizikai Munkabizottsága nevében:

Bobátka Sándor elnök és *Csik Attila* titkár

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

Meghívó szemináriumra

Az ELFT Vákuumfizikai, -Technológiai és Alkalmazásai Szakcsoportja és a IUVSTA Magyar Nemzeti Bizottsága közös szemináriumot szervez 2006. november 7-én, kedden, 14 órakor az ELFT székházában (Budapest II. ker. Fő u. 68. II. em. 222. szoba), melynek programja:

Gergely György (MFA, Budapest): *25 éves a Rugalmas Elektron Szórás Spektrometria (EPES). Kvantitatív EPES.*

A szakcsoporton belül „tiszteletbeli elnök” cím létesítése, tiszteletbeli elnökök választása.

Minden érdeklődőt szeretettel várnak a rendezők.

HÍREK ITTHONRÓL

IAMPI06 konferencia

Jelentős nemzetközi lézerfizikai konferencia színhelye volt 2006. október 1. és 5. között a szegedi Hotel Forrás. Az IAMPI06 konferencia neve az *Interaction of Atoms, Molecules and Plasmas with Intense Ultrashort Laser Pulses* témamegjelölés rövidítéséből származik. Az idei rendezvényen 23 ország összesen 116 képviselője vett részt 59 szóbeli és 30 poszteres előadással. A konferenciát az Európai Unió COST P14 ULTRA programja és a Marie Curie Research Training Network XTRA hálózata kezdeményezte és támogatta, a Magyar Tudományos Akadémia két intézete, az RMKI és az SZFKI, valamint a Szegedi Egyetem Fizika Tanszékcsoportja szervezte.

A konferencia lehetőséget adott az atom- és molekulfizikusoknak, valamint a plazmafizikusoknak, hogy megismerkedjenek egymás munkájával. A távolinak tűnő

területek közötti kapcsolatot az ultrarövid, többnyire csupán néhány, vagy néhányszor 10 femtoszekundumos lézerimpulzusok ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), illetve az általuk keltett még rövidebb, az attoszekundumos tartományba sorolható impulzusok ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) létesítik. A kapcsolat a rövid impulzusok és az atomok, molekulák, illetve plazmák között kétoldalú. Egyfelől az ultrarövid impulzusok lehetővé teszik a gyors folyamatok időbeli felbontását, másrészt a kölcsönhatások ismerete módot ad még rövidebb impulzusok előállítására.

A sok nagyszerű, új eredmény közül e sorok írójában a legmélyebb benyomást talán a lézeres elektrongyorsítás keltette, amellyel 1 GeV-es, kvázi-monokromatikus elektronnalábót sikerült előállítani. Az ultrarövid impulzusokkal molekulákat sikerült leképezni, számot adva például a hidrogénatomok gyors mozgásáról a hidrogénmo-

lekula ionokban, valamint szénhidrogén molekulákban. Egyedülállóan hosszú impulzust sikerült előállítani oly módon, hogy a molekulákban az attoszekundumos időskálán lejátszódó elektron dinamikát polarizációs kapuzással kontrollálták. A lézerplazmában előállított magas felharmonikusok egészen 3,7 keV energiáig nemcsak ko-

herens fotonokat jelentenek ebben a tartományban, hanem lehetőséget a még az attoszekundumnál is rövidebb impulzusok keltésére a kapott harmonikusok spektrumának megfelelő szűrésével.

Földes István, KFKI RMKI
a helyi szervezőbizottság elnöke

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Tudomány és média – németországi magyar kutatók második találkozója

Több mint negyvenen vettek részt 2006. október 6-án a németországi magyar kutatók második konferenciáján, melyet *Peisch Sándor* nagykövet nyitott meg a berlini magyar nagykövetségen. A nagykövet üdvözölte a németországi magyar kutatókat az egynapos konferencián, melynek középpontjában a tudománykommunikációs tevékenység fontossága állt.

A rendezvény ötlete *Babcsán Norbert* mérnök-fizikustól származik, aki két éve – még szerényebb keretek között – szervezte meg az első ilyen találkozót.

Fabri György, az MTA Kommunikációs Titkárságának igazgatója a tudomány és a média kapcsolatáról, annak fontosságáról beszélt. *Palugyai István* újságíró a tudományos újságírás szakszerűségének fontosságát és a tudományos ismeretterjesztő sajtó jelenlegi helyzetét elemezte.

A tanácskozáson elhangzottak igazolták, hogy a németországi magyar kutatók nagy érdeklődést mutatnak az Akadémiával kapcsolatos sajtóviták, a hazai fejlemények iránt, és igénylik a felelősségteljes részvételt a magyar tudományos köztestületi életben.

Észak-Korea atomkísérletet hajtott végre?

Október 9-én Észak-Korea bejelentette, hogy sikeres atomkísérletet hajtott végre, „olyan történelmi eseményt, amely hadseregének és népének nagy örömet okozott”. A bejelentés nagy felzúdulást keltett nemzetközi körökben. A kínai vezetés azonnal elítélő nyilatkozatot tett, amiért „Észak-Korea semmibe vette a nemzetközi közösség széleskörű tiltakozását, és arcátlan módon lefolytatta a kísérletet.”

Az orosz védelmi miniszter szerint egy 5–15 kilotonnás szerkezetet robbantottak, legalább olyan romboló erejűt, mint amilyen a II. világháborúban Hirosimára ledobott bombáé volt. Az orosz megfigyelések detektálták a robbanást, de sugárzást nem észleltek.

Az USA Geológiai Szolgálat 4,2 erősségű *szeizmikus eseményt* észlelt, amely 10:35-kor történt, az észak-koreai fővárostól, Phenjantól északkeletre körülbelül 390 kilométerre. A dél-koreai titkosszolgálat szerint a kísérletet valószínűleg egy föld alatti barlangrendszerben hajtották végre, nem messze attól a helytől, ahol július 4-én hét ballisztikus rakétakísérletet végeztek.

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség szerint: „A megfigyelt atomkísérlet veszélyezteti az atomsorompó egyezményt, és komoly veszélyt jelent nemcsak a kelet-ázsiai térségre, hanem az egész nemzetközi közösség számára.”

Néhány nap elteltével azonban az atomkísérlettel kapcsolatban több új kérdés vetődött fel. A robbanás méretét illetően megoszlanak a vélemények, bár a legtöbb szakértő egyetért abban, hogy a szeizmológiai adatok alapján a hatás körülbelül 500 tonna TNT-vel ekvivalens. Ha valóban ez a helyzet, akkor a robbantás sikertelen volt, a láncreakciót nem sikerült beindítani.

Sokkal aggasztóbb az a lehetőség, hogy a koreaiak egy bonyolultabb fegyvert, egy hidrogénbomba első fokozatát próbálták ki, amelynek a termonukleáris robbanást kell beindítania. Egyes vélemények szerint Észak-Korea az első atomkísérletét, Pakisztánnal közösen, már 1998-ban végrehajtotta, amikor a két ország szorosan együttműködött nukleáris programjában. A legvalószínűbb azonban egy egyszerű, szférikus implóziójú plutóniumbomba robbantása.

Siegfried Hecker, a Los Alamos Nemzeti Laboratórium korábbi igazgatója 2004–2005-ben látogatást tett az észak-koreai atomprogram kutatóinál, és őv attól, hogy képességeiket alábecsüljék. Valószínűtlennek gondolja a hidrogénbomba első fokozatának a kipróbálását. A robbanás méretéből arra következtet, hogy esetleg a bombának egy olyan miniatürizált változatát akarják kifejleszteni, amelyet ballisztikus rakétával is a célpontba lehet juttatni. Ez, természetesen, rendkívüli módon megnöveli a műszaki nehézségeket.

A legtöbb becslés szerint Észak-Koreának 6–8 bombára elegendő hasadóanyaga van. Lehetséges, hogy a cél valóban olyan ballisztikus hordozóra való felszerelés, mint a *TaePodong-2* rakéta, amely a július 4-én végzett sikertelen kísérletben 42 másodpercnyi repülés után a tengerbe csapódott.

Végősoron az a körülmény, hogy az atomkísérlet sikeres vagy sikertelen volt, nem befolyásolja az olyan országok reakcióját, mint az Egyesült Államok vagy Kína. Politikai szempontból a kísérlet sikere lényegtelen, csak a szándék számít!
<http://www.nature.com>

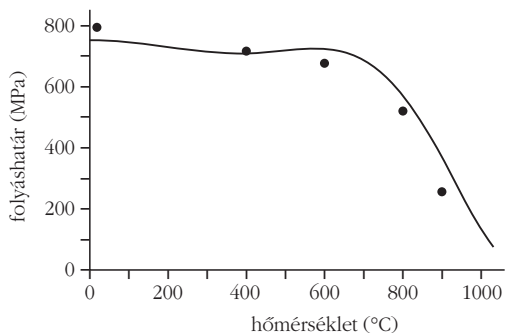
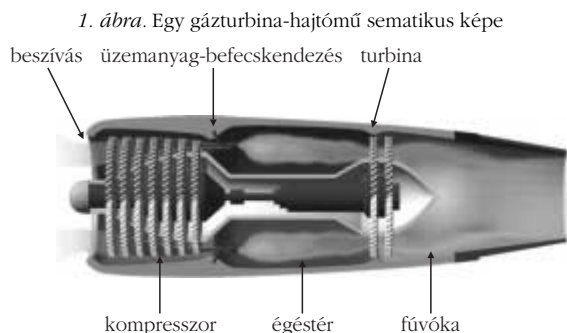
SZUPERÖTVÖZET EGYKRISTÁLYOK

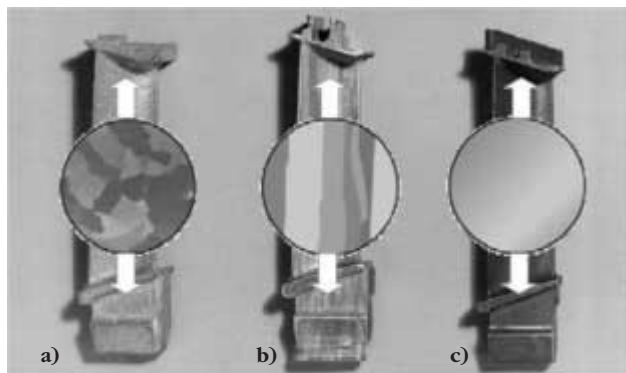
– drágakövek a gázturbinákban

A mai, korszerű repülőgépeket szinte kizárólag gázturbinákkal, vagy más néven sugárhajtóművekkel szerelik fel, de használnak gázturbinákat erőművekben is. A gázturbina az egyik legfejlettebb energiaátalakító berendezés. Működése során a gázturbina (1. ábra) környezeti nyomású gázt (sugárhajtómű esetén levegőt) szív be, amelyet kompresszorban nagy nyomásra sűrít, az égéstérben üzemanyagot kever hozzá, és meggyújtja a keveréket. Az így keletkező magas hőmérsékletű és nagy nyomású gáz forgatja a turbínát, majd a fűvókákon át a környezetbe távozik. Az első működő modelleket 1939-ben használták fel a repülőgépgyártásban és az energiatermelésben. Azóta, tervezők és kutatók generációinak munkája nyomán, a gázturbinák termikus hatásfoka az akkori 18-ról 60 százalékra nőtt. Mint minden hőerőgépnek, a gázturbinának is annál nagyobb a hatásfoka, minél nagyobb a munkaközeg legmagasabb és legalacsonyabb hőmérséklete közötti különbség. Ez azt jelenti, hogy a hatásfok növeléséhez az égéstérből a munkatermelő részbe kilépő gázkeverék hőmérsékletét a lehető legmagasabbra kell emelni. A turbina bemenő részére érkező gáz hőmérséklete a korszerű, nagyteljesítményű sugárhajtóműveknél elérheti az 1650 °C-ot (a nem repülési célú turbináknál ez a hőmérséklet valamivel alacsonyabb, 1500 °C alatt marad). Ezt a magas hőmérsékletet kell elviselniük a turbina terelőlemezeinek és a turbinalapátoknak. Ez utóbbiak ráadásul még percenként akár 10 000-et meghaladó fordulatszámokon forognak is. Gondoljuk végig, hogy ez milyen mechanikai igénybevételeket jelent! Olvadáspontjukhoz közeli magas hőmérsékleten, állandó erő hatására az anyagok – még a szilárdsági határuknál jóval alacsonyabb mechanikai feszültségek mellett is – időben lassan, de változtatják alakjukat: ezt a folyamatot kúszásnak, vagy tartósfolyságnak nevezzük. A forgó alkatrészek az állandó terhelő erő mellett még időben periodikusan változó terhelésnek is ki vannak téve, ezt az igénybevételt fárasztásnak, a hatására elszenvedett károsodást fáradásnak nevezzük. A fáradás jellemzője, hogy a nagy ciklusszám miatt még a folyáshatárhoz képest igen alacsony amplitúdójú feszültség-ingadozások mellett is vi-

szonylag hamar az anyag törésére vezethet. Mindehhez járul még a magas hőmérsékletű közeg igen agresszív korróziós hatása. Nyilvánvaló tehát, hogy a turbinalapátok konstrukciója – anyaguk és felépítésük – kulcskérdés a modern gázturbinák teljesítményének növelésénél.

Manapság a turbinákban a legmagasabb hőmérsékleteknek kitett terelőlemezeket és turbinalapátokat különlegesen magas olvadáspontú nikkeltötvözetekből, úgynevezett nikkeltötvözetekből készítenek, amelyekben összesen körülbelül 10at% titánt és alumíniumot ötvöznek a nikkellel. A szuperötvözetek legújabb generációi számos további adalékelemet (leggyakrabban krómot, molibdént, wolframot, tantált és réniomot) is tartalmaznak. Ezek az ötvözetek megőrzik szilárdságukat (2. ábra), és ellenállnak a korrózióknak extrém magas hőmérsékleteken is. (A szuperötvözetekről számos további információt találhatunk az interneten a <http://en.wikipedia.org/wiki/Superalloy> címről elindulva.) Mivel még ezek a szuperötvözetek is kilágyulnak és megolvadnak 1200–1350 °C közötti hőmérsékleteken, az égéstérhez legközelebb elhelyezkedő alkatrészeket hűteni kell ahhoz, hogy üzemi hőmérsékletük ne haladja meg olvadáspontjuk 0,8–0,9-szeresét, itt ugyanis elveszítik szilárdságukat és tönkremennek. A hűtés miatt a turbinalapátok bonyolult öntött szerkezetek, amelyekbe jól megtervezett belső levegőjáratokat, felületükre pedig gondosan megtervezett elrendezésben lyukakat helyeznek el, hogy a kompresszorból odavezetett hideg levegő megfelelően hűtse a lapátok felületét. Az oxidáció és egyéb nemkívánatos szennyeződések elkerülésére az öntést vákuumkamrákban végzik. Öntés után a legmagasabb hőmérsékleteknek kitett lapátok felületét még hőszigetelő kerámia-bevonattal is elláthatják, ami mintegy 150 fokkal hőmérséklet-emelést tesz lehetővé. Felmerül a kérdés, hogy miért nem készítik a turbinalapátokat, esetleg az egész turbinát teljesen kerámiából, ami hőálló és korrózióknak is ellenáll. Vannak ilyen próbálkozások, amelyeket azonban megnehezít a kerámiaanyagok ridegsége, ami miatt





egyenlő tengelyű szemcsék oszlopkristályok egykristály

3. ábra. Különböző mikroszerkezetű turbinalapátok

nem lehet hozzájuk egy meghatározott folyáshatárt rendelni. Ezzel a kérdéssel, a rideg anyagok mechanikai tulajdonságainak jellemzésével, majd sorozatunk egy későbbi cikkében foglalkozunk részletesebben.

A szokványos öntési eljárásokkal készített darabok az öntőformában végbemenő megszilárdulás során keletkező piciny (jellemzően 1 és 100 mikrométer közötti) egyenlőtengelyű kristályokból, úgynevezett szemcsékből felépülő háromdimenziós mozaikok (3.a ábra). Minden egyenlőtengelyű szemcsé kristályrácsának orientációja eltér a szomszédjaitól. A szomszédos szemcséket az anyag belsejében lévő határfelületek, a szemcsehatárok választják el egymástól. Ezeken a szemcsehatárokon – különösen magas hőmérsékleti igénybevételek során – olyan kellemetlen jelenségek lépnek fel, mint a szemcsehatár menti elmozdulás, üregesedés, repedésképződés, nagyobb kémiai aktivitás. Mindezek a jelenségek csökkentik a kúszással és fárasztással szembeni ellenállást, a kémiai aktivitás pedig növeli a korrózióérzékenységet.

Az üzembiztonságot – érthető módon – legjobban azok a szemcsehatárok veszélyeztetik, amelyek felülete a legnagyobb mechanikai igénybevételt jelentő centrifugális erőre közel merőleges (a hosszirányú centrifugális gyorsulás elérheti a 20000 g értéket is). Ezért vezették be 1966-ban az irányított kristályosítással megszilárdított oszlopos szemcseszerkezetű turbinalapátokat (3.b ábra). A vákuumkamrában az irányított megszilárdítás úgy történik, hogy szuperötözet-olvadékok öntenek egy, a turbinalapát alakjának megfelelő, függőleges kerámia-öntőformába, amelyet az olvadék hőmérsékletére hevítenek. Az öntőformát alulról egy vízzel hűtött rézlap zárja le, amelyen megindul a kristályosodás, és a szilárd/olvadék határfelület az öntőforma hosszában halad alulról felfelé. Az öntőformát olyan hőmérséklet-szabályozott kemencével veszik körül, amely biztosítja, hogy a megszilárduláskor felszabaduló látens hő a rézlap felé, tehát hosszirányban lefelé vezetődjön el. A megszilárdítás során a formát lassan süllyesztenek lefelé a kemencéből. Az így megszilárdított turbinalapátban az oszlopos szemcsék közötti határfelületek a centrifugális erő irányában állnak, ennek köszönhetően megnő a kúszással és fárasztással szembeni ellenállás.

Az irányított kristályosítás továbbfejlesztéseként hozták létre az 1970-es évektől kezdődően a szemcsehatároktól teljesen mentes, egyetlen kristályból álló egykristály-turbinalapátokat (3.c ábra). Az öntés hasonlít az irányított kris-



4. ábra. Egykristály-turbinalapát a „malacfarokkal”

tályosításnál alkalmazott módszerhez, a hűtött rézlapon oszlopos kristályok kezdenek nőni, de ez az alsó, indító tartomány felül egy spirál alakú, „malacfarok”-nak nevezett öntőcsatornába torkollik (4. ábra), amely a több növekvő szemcséből kiválaszt egyetlen egyet. Ez a malacfarokból kijutva belenő a lapát tövébe, és a forma megfelelően vezérelt süllyesztésével tovább növekedve felépíti az egész bonyolult turbinalapátot egyetlen kristályból. Ennél az eljárásnál különösen kritikus az egyirányú (lefelé történő) hőelvezetés, mivel bármilyen oldalirányú hővezetés másodlagos kristályszemcsék keletkezésére vezet, megüszítva az egykristály-növesztést. Az elmúlt 35 évben az eljárást számos részletében tovább tökéletesítették, elérve a 95%-ot meghaladó eredményességet. Ezzel együtt az egykristály-turbinalapátok még mindig a turbinák legmagasabb hozzáadott értéket tartalmazó alkatrészei, a gázturbinák „drágakövei”. Az első egykristálylapátokból felépített sugárhajtómű 1982-ben kapott repülési engedélyt, ma ilyen hajtóműveket építenek be például a Boeing 767 és az Airbus 310 típusú gépekbe.

Az egykristály-turbinalapátok a sugárhajtóművekben kilencszeres élettartamot érnek el kúszással és fáradással szemben az egyenlőtengelyű szemcsékből készített darabokéhoz viszonyítva, korrózióval szembeni ellenállásuk is háromszoros. A mai magas hatásfokú és hosszú élettartamú (kb. 25000 óra üzemidő nagyjavítások között) sugárhajtóművek nem lennének lehetségesek az egykristály-turbinalapátok nélkül. A szemcsehatárok kiküszöbölésével megnőtt a turbinalapátok termikus és kifáradási élettartama, javult a korrózióállóságuk, vékonyabb falakkal gyárthatók (anyag- és súlymegtakarítás), és magasabb az olvadáspontjuk. Ezek a tényezők mind hatásfok-növekedést eredményeznek.

A történet újabb fejezete az egykristálylapátok bevezetése az áramtermelő gázturbinákban. A 200 és 400 MW közötti villamos teljesítményt előállító berendezésekben használatos lapátok mérete ugyanis tízszerese a sugárhajtóművekben működőkének. Ilyen méretű lapátok egyirányú kristályosítással történő előállítására még a közelmúltban is csak magas selejthányaddal volt megvalósítható, és ez jelentősen emelte az amúgy sem alacsony gyártási költségeket. A kritikus egyirányú hőelvezetés biztonságának javításával értek el jelentős javulást az egykristálygyártásban. A világ egyik legnagyobb, közel 60%-os termikus hatásfok mellett 530 MW villamos teljesítményt adó, gázturbináját 2003-ban állították üzembe Walesben. A legmagasabb hőmérsékleten működő egykristály-turbinalapátok körülbelül 45 cm hosszúak (a repülőgép hajtóművekben 6–8 cm-es lapátok vannak), egyetlen egykristálylapát tömege körülbelül 15 kg.

Lendvai János, ELTE Anyagfizikai Tanszék