

# Természet Világa

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY

148. évf. 11. sz.

2017. NOVEMBER

ÁRA: 780 Ft

Előfizetőknek: 670 Ft

*J. P. Wigner*



- TALÁLKOZÁS WIGNER JENŐVEL ERICÉBEN
- CSOPORTVÉSZ A MAGFIZIKÁBAN
- WIGNER JENŐ, A FASORI DIÁK
- NEGYEDIK GENERÁCIÓS GYORSREAKTOR
- DÉMONI KÓNIKUS KERESZTEZŐDÉSEK



# Wigner-épületek



EBBEN A HÁZBAN SZÜLETETT  
**WIGNER JENŐ**  
1902 – 1995  
NOBEL – DÍJAS FIZIKUS,  
A FASORI EVANGÉLIKUS GIMNÁZIUM  
EGYKORI DIÁKJA,  
AZ EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
DÍSZDOKTORA,  
AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT  
TISZTELETBELI TAGJA.  
MAGYARSÁGÁT MINDIG VÁLLALTA.  
AZ ATOMREAKTOROK KIFEJLESZTÉSÉBEN  
ÉS AZ ATOMFIZIKÁBAN AZ EMBERISÉG  
SZÁMÁRA MARADANDÓT ALKOTOTT.

Wigner szülőháza a Király utcában, Budapesten



Princetoni lakása



Wigner Jenő Műszaki Informatikai Középiskola és Kollégium, Eger



Wignerről elnevezett épület a Berlieni Műszaki Egyetemen



Az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont telephelye Csillebércen



# Természet Világa



A TUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTŐ  
TÁRSULAT FOLYÓIRATA

Megindította 1869-ben  
SZILY KÁLMÁN  
KIRÁLYI MAGYAR  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI TÁRSULAT

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY  
148. ÉVFOLYAMA



2017. 11. sz. NOVEMBER  
Magyar Örökség-díjas és  
Millenniumi Díjas folyóirat



nka



Szellemi Tulajdon  
Nemzeti Hivatala



EMBERI ERŐFORRÁS  
TÁMOGATÁSKÉZELŐ

Megjelenik a Nemzeti Kulturális Alap, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő, a Nemzeti Tehetség Program és a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala támogatásával.



A kiadvány a Magyar Tudományos  
Akadémia támogatásával készült.

Megbízott főszerkesztő:  
GÓZON ÁKOS

Szerkesztőség:

1088 Budapest, Bródy Sándor u. 16.  
Telefon: 06-1-327-8950, fax: 06-1-327-8969  
E-mail-cím: termvil@titnet.hu  
Internet: www.termeszetvilaga.hu

Felelős kiadó:  
PIRÓTH ESZTER  
a TIT Szövetségi Iroda igazgatója

Kiadja  
a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat  
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.  
Telefon: 06-1-327-8900

Nyomás:  
PAUKÉR Nyomda

Felelős vezető:  
Vértes Gábor

INDEX25 807  
HU ISSN 0040-3717

Hirdetésfelvétel a szerkesztőségben

Korábbi számok megrendelhetők:  
Tudományos Ismeretterjesztő Társulat  
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.  
Telefon: 06-1-327-8950  
e-mail: titlap@telc.hu

Előfizetés, reklamáció:  
Magyar Posta Zrt.  
Telefon: 06-1-767-8262  
E-mail: hirlapelőfizetes@posta.hu  
Internet: eshop.posta.hu  
Postacím: MP Zrt., Budapest 1900.

Előfizetésben terjeszti: Magyar Posta Zrt.  
Árusításban megvásárolható a Lapker Zrt. árusítóhelyein.

Előfizetési díj:  
fél évre 4200 Ft, egy évre 8040 Ft

# TARTALOM

Előszó.....	482
<b>Sólyom Jenő:</b> Wigner Jenő, a modern szilárdtest-fizika egyik elindítója .....	482
<b>Abonyi Iván:</b> Találkozás Wigner Jenővel Ericében .....	486
<b>Solt György:</b> Matematika és a természettudományos megismerés .....	489
<b>Koniorczyk Máttyás – Kiss Tamás – Ádám Péter:</b> Wigner-függvények a kvantumoptikában.....	492
<b>Horváth Dezső:</b> A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit?.....	495
<b>Domokos Péter:</b> A kvantummechanikától a kvantumtechnológiáig .....	500
<b>Cseh József:</b> Wigner és a csoportvész a magfizikában. 80 éves a supermultiplett-elmélet.....	504
<b>Varga Imre:</b> A Wigner–Dyson-osztályozás és az Anderson-féle fém-szigetelő átmenet.....	509
<i>E számunk szerzői</i> .....	512
<b>Gadó János:</b> Negyedik generációs gázhűtésű gyorsreaktor .....	512
<b>Hózer Zoltán:</b> Atomerőművi fűtőelemek .....	516
<b>Vibók Ágnes – Csehi András – Halász Gábor:</b> Démoni kónikus keresztvezdés .....	520
<b>Palágyi Györgyné:</b> Wigner Jenő, a fásori diák .....	524
<b>Radnai Gyula:</b> Párhuzamos életek. Különleges születési évfordulók 2017-ben. Második rész.....	525

*Címképünk:* Wigner Jenő (*Forrás: Oak Ridge National Laboratory honlapja*)

*Borítólapunk második oldalán:* Wigner-épületek

*Borítólapunk harmadik oldalán:* Wigner-emlékek

*Mellékletünk:* A XXVI. Természet–Tudomány Diák pályázat írásai: (*Petryty Luca:* Fazekas Mihály életműve; *Bór Dorina – Kocsis Ábel:* Hol „tartunk”?; *Abebe Adrienn:* Az emlősvese anatómiája, működésének fizikai modellezése). *Kántor Sándorné:* Segner János András, a turbina atyja. A TIT Kalmár László Matematikaverseny meghirdetése

## SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Elnök: VIZI E. SZILVESZTER

Tagok: ABONYI IVÁN, BACSÁRDI LÁSZLÓ,  
BAUER GYÖZÖ, BENCZE GYULA, BOTH ELŐD, CZELNAI RUDOLF,  
CSABA GYÖRGY, CSÁSZÁR ÁKOS, DÜRR JÁNOS, GÁBOS ZOLTÁN,  
HORVÁTH GÁBOR, KECSKEMÉTI TIBOR, KORDOS LÁSZLÓ,  
LOVÁSZ LÁSZLÓ, NYIKOS LAJOS, PAP LÁSZLÓ,  
PATKÓS ANDRÁS, RESZLER ÁKOS,  
SCHILLER RÓBERT, CHARLES SIMONYI, SÓTONYI PÉTER,  
SZATHMÁRY EÖRS, SZERÉNYI GÁBOR, VIDA GÁBOR, WESZELY TIBOR

Szerkesztők:

KAPITÁNY KATALIN (yka@titnet.hu; 06-1-327-8962)  
NÉMETH GÉZA (n.geza@titnet.hu; 06-1-327-8961)  
LŐRINCZ HENRIK (lorinczhenrik@telc.hu; 06-1-327-8961)  
NYERGES GYULA (nyergesgyula@telc.hu; 06-1-327-8960)

Tördelés: LÉVÁRT TAMÁS

Szerkesztőségi irodavezető:  
CZUCZKA ÉVA (titlap@telc.hu; 06-1-327-8950)



# Wigner 115

## Előszó

Az Európai Tudományos Újságíró Szervezetek Szövetségének (EUSJA) egyik éves összejövétele után, a fehér asztal melletti beszélgetésen történt, hogy egy kolléga felvetette: keressen ki-ki olyan kutatót a saját hazája tudománytörténetéből, aki személyében szimbolizálhatja az adott ország természettudományos eredményeit, hozzáadott értékét az – akkor éppen az ezredfordulót vártuk – aktuális egyetemes műveltséghez.

Mindenki rögtön mély hallgatásba és ezzel együtt lázas gondolkodásba kezdett. A feladat nehéznek bizonyult. Kinek a szemszögéből tekintsünk hirtelen több évszázad felhalmozott tudására? Magyarország esetében a XXI. században használatos magyar tankönyvek ismeretanyaga felől? Ami mindenki számára többé-kevésbé ismert tudáskincsnek tekinthető? Vagy keressük

a leginkább újító elméket? Soroljuk a Nobel-díjasokat? Vagy ellenkezőleg: a méltatlanul mellőzötteket?

Senki sem akart elsőként megszólalni a tudományos újságírók – amúgy máskor meglehetősen közlékeny – köréből. Bevallom, én sem siettem az élre. De akkor egy, ha jól emlékszem, német kol-



léga kéretlenül is segítségemre sietett: „Ja, a magyaroknak könnyű, nekik van Wignerük!” (Nem felejttem azóta sem szó szerinti, bár nem a legválasztékosabb angol felkiáltását: *It's easy for you, Hungarians, you have your Wigner...*)

*Wigner?* Miért éppen Wigner? – csodálkoztam magamban. A lassan azért csak beinduló szellemi játék után meg is kérdeztem tőle. Azt felelte mosolyogva: „Wigner annyi tudományterülettel foglalkozott, hogy önmagában megtölt nektek egy egész lexikont...”

Ha egy teljes kézikönyvre nem is, egy tematikus szám szerkesztésére ezúttal mi is vállalkoztunk Wigner Jenő születésének 115. évfordulója alkalmából, a Tudományünnep hónapjában, az MTA Wigner Kutatóközpont szellemi segítségével, a Magyar Tudományos Akadémián a tudós születésnapján, november 17-én rendezendő tanácskozási programjához kapcsolódva, amelyben éppen a kutatói pálya e sokszínűségét, megannyi lehetséges hatását szeretnénk felvillantani.

GÓZON ÁKOS

SÓLYOM JENŐ

# Wigner Jenő, a modern szilárdtest-fizika egyik elindítója

Meglepőnek tűnhet a címben megfogalmazott állítás, hiszen Wignerre sokkal inkább magfizikusként, a reaktorfizika egyik atyjaként, a szimmetriáknak a fizikában játszott döntő szerepe egyik szószólójaként gondolunk. Az 1930-as évek második felétől Wigner valóban főként magfizikával foglalkozott, a háború alatt és közvetlenül utána a világ első „reaktormérnökeként” ő tervezte az első működő atomreaktorokat, 1963-ban a Nobel-díjat „az atommagok és az elemi részecskék elméletének továbbfejlesztéséért, különös tekintettel az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért” kapta. Mégis, amint látni fogjuk, joggal tekinthetünk rá úgy is, mint aki közvetlen munkatársaival a modern szilárdtest-fizika egyik megalapozója volt.



A fiatal Wigner

Wigner 1930-ban ment Németországból Amerikába, Princetonba. A meghívás érdekessége, hogy a princetoni egyetem eredetileg Neumann Jánost kívánta teljes állásban alkalmazni, de Neumann javaslatára az állást megosztották közte és Wigner között. Egyéves előadói felkérés után további öt évre kapott vendégelőadói megbízást, de változatlanul csak félállásban. Idejének felét tehát máshol – részben Magyarországon – töltötte. 1932 és 1936 között mégis kialakult körülötte egy csoport Princetonban, mely irányításával nagyban hozzájárult a modern szemléletű szilárdtest-fizikához.

A múlt század harmincas éveinek elejére világossá vált, hogy a kvantummechanika segítségével megbízható pontossággal, a kísérletekkel egyezésben le lehet írni az atomok és az egyszerű molekulák állapotát, az energiaszintjeik közötti átmenete-



ket, vagyis a megfigyelhető spektrumokat. Természetesen kínálkozott az ötlet a folytatásra: a szilárd testek tulajdonságainak hasonló, a kvantummechanikán nyugvó tárgyalását kell adni.

A szilárd testeket összetartó erők részben már ismertek voltak. Az ionkristályok, például a kősó (nátrium-klorid) szerkezetének megértéséhez elég annyit tudni, hogy a periódusos rendszer első oszlopában lévő alkálifémek atomjai könnyen leadnak egy elektront, az utolsó előtti oszlopban lévő halogének pedig könnyen felveszik azt, mivel így minden elektron lezárt héjba kerül. Az így létrejövő pozitív és negatív töltésű, térben váltakozva elhelyezkedő ionok közötti Coulomb-kölcsönhatás eredményezi a stabilis szerkezetet. Ennek alapján az ionkristályok kötési energiája is meghatározható.

Az is ismert volt, hogy más mechanizmussal, de ugyancsak a külső elektronhéjakon lévő elektronok biztosítják a kötést a periódusos rendszer közepén lévő, azonos típusú atomokból felépülő – felvesztető, illetve szigetelő – kristályos szilíciumban, germániumban és gyémántban. A külső elektronok a szomszédos atomok között helyezkedve el, irányított, ún. kovalens kötést hoznak létre, hasonlóan ahhoz, ahogy két hidrogénatom elektronjaik révén  $H_2$ -molekulává kötődik össze. Ilyen mechanizmussal lehetett a kvantummechanika segítségével megérteni a vegyületek jelentős részében a kémiai kötést, ahogy azt *Linus Pauling* az 1933-ban megjelent *The Nature of the Chemical Bond* című cikkében megmutatta. Ezek az egyszerű fizikai képen alapuló megfontolások azonban nem magyarázták meg, hogy milyen erők tartják össze a fémeket, amelyekben az elektronok nem az ionok zárt elektronfelhőiben, nem is az atomok közötti kovalens kötésben helyezkednek el, hanem viszonylag szabadon mozognak, ezzel téve lehetővé a fémes vezetést.

A fémek első kvantummechanikán alapuló modellje már 1927-ben megszületett. Az ionokat homogén pozitív háttérként kezelve, amely éppen semlegesíti az elektronok töltését, a fémek tulajdonságokért felelős elektronok rendszerét *A. Sommerfeld* úgy tárgyalta, mint töltés nélküli szabad részecskék gázát. Ezzel megkerülte a fémes kötés kérdését, de a fémek néhány tulajdonságát jól meg tudta magyarázni. Azt csak jóval később, *L. D. Landau* munkássága révén értettük meg, hogy ez a látszólag durva közelítés, az elektronok közötti Coulomb-kölcsönhatás elhanyagolása, miért ad az egyszerű fémekre viszonylag jó eredményeket.

Az elektronok közötti kölcsönhatásról azonban általában nem feledkezhetünk el. *D. R. Hartree* egy 1929-ben megjelent



Az első doktorandusz,  
Frederick Seitz

munkájában megmutatta, hogy azt legegyszerűbben úgy vehetjük figyelembe, hogy a többi, mozgó elektron hatását egy átlagos potenciállal helyettesítjük. Ezen javított egy évvel később *V. Fock*, aki a kvantummechanikai részecskék megkülönböztethetlenségéből adódó, az azonos állású spinű elektronok között fellépő kicserélődési kölcsönhatás kezelésére javasolt módszert. Ezek segítségével már egyszerű magyarázatot lehetett adni a fémes kötésre, és – legalábbis egyszerű fémek esetén – kvantitatívan is majdnem jó értékeket a kötési energiára.

Wigner érezte, hogy bármilyen komoly számoláshoz túl kell lépni a fenti közelítésen. Egyrészt realisztikusabb potenciált kell használni az ionokra, másrészt szükség van az elektronok közötti dinamikus korrelációk pontosabb figyelembevételére. A Wigner által bevezetett szóhasználatnak megfelelően ma is minden járulékot, amely túlmegy a Hartree–Fock-közelítésen, korrelációs energiának nevezünk. Ennek a problémának, a fémes kötésnek a pontosabb tárgyalására vállalkozott első doktoranduszával, *Frederick Seitz*cel.

Frederick Seitz (1911–2008) stanfordi diákként ismerkedett meg *Edward Condon*nal, aki akkor ott vendégelőadó volt. Ő javasolta neki, hogy Princetonban folytassa tanulmányait. 1932-ben, amikor Seitz Princetonba érkezett, Condon is ott volt, és *George Shortley*-val éppen a *The Theory of Atomic Spectra* című könyvükön dolgoztak. Elfoglaltsága miatt rábeszélte Seitzet, hogy Wigner diákjaként a kristályos anyag kvantumelméletével foglalkozzon. Ebből születtek meg Wigner ötlete nyomán az egyik legegyszerűbb fém, a nátrium kötési energiáját tárgyaló

cikkeik 1933-ban és 1934-ben. Ezekben az elektronállapotok energiája meghatározására egy új módszert vezettek be, a ma Wigner–Seitz-módszerként ismert cellamódszert.

Ennek lényege az, hogy a kristályok diszkrét transzlációs szimmetriája – a rácsállandó többszöröseinek megfelelő eltolással szembeni invarianciája – miatt a hullámfüggvényre vonatkozó Schrödinger-egyenletet elegendő a kristály egyetlen elemi cellájában megoldani. Az egész kristályra érvényes megoldást és a megfelelő energiaértékeket úgy kaphatjuk meg, hogy kihasználjuk az elektronállapotok hullámfüggvényére vonatkozó, az eltolási szimmetriából adódó határfeltételt az elemi cella áttelenséges oldalainál. Ezt könnyű kimondani, a gyakorlati kivitelezés azonban rendkívül nehéz. A munka egyik lényeges eleme az volt, hogy a szokásos elemi cella helyett a kristály szimmetriáihoz jobban illeszkedő, az atomokra centrált cellákat (Wigner–Seitz-cella) használtak, amelyek majdnem gömbszerűek, s ezért a pontosság feladása nélkül a számolás lényegesen tovább egyszerűsíthető gömb alakú cellákkal. A másik az volt, hogy a szabad ionokra egy realisztikus, az atomfizikából vett  $V(r)$  potenciált használtak. Végül újdonság volt, hogy a Hartree–Fock-közelítésen túllépve, a korrelációs effektusokat is vizsgálták.

Érdekes módon Seitz nem ezzel a munkával, hanem a kristályok minden szimmetriáját tartalmazó tércsoportokkal kapcsolatos dolgozatával szerezte meg 1934-ben a PhD-t. Egyéves posztdoktori tartózkodás után hagyta el Princetont, de nem hagyta el az anyagudományt, a szilárdtest-fizikát. Rochesterbe kerülve határozta el, hogy összefoglaló könyvet ír, amelyben szándéka szerint a szilárd testekben megfigyelhető sokféle jelenség egységes, koherens tárgyalását adja. Így született meg az 1940-ben megjelent *The Modern Theory of Solids* című könyve. Ennek egyik nagy érdeme az volt, hogy felhívta a diákok figyelmét, különösen a háború utáni időben, amikor már nem az atombomba készítése volt a fizikusok legsürgetőbb feladata, hogy egy új tudományterület született, ahol rengeteg izgalmas kérdés vár megoldásra.

Seitz ezután több egyetemen, illetve kutatóintézetben dolgozott, leghosszabban Illinois állam Urbanában lévő egyetemén, létrehozva ott az Anyagudományi Kutatólaboratóriumot. Amikor az ötvenes évek elején azt tapasztalta, hogy a szilárdtestfizika rengeteg olyan eredményt hozott, amelyeket már nem lehet egyetlen könyvbe foglalni, *David Turnbull* elindította a *Solid State Physics: Advances in Research and Applications* sorozatot. Eredetileg hat



kötetben akarták bemutatni a szilárdtest-fizika új eredményeit, de azután ebből egy sikeres könyvsorozat nőtt ki.

Visszatérve Wignerre, a fémek kohéziós energiájának számolásából született az 1934-ben önállóan írt cikke és a Wigner-kristály ötlete. A fémek kötéséről alkotott képünk szerint a kötést az elektronok kinetikus energiájának és a kölcsönhatásnak a versengése alakítja ki. A fémekre jellemző elektronsűrűségeknél mindkét tag azonos nagyságrendű járulékat ad a teljes energiához. Más a helyzet, ha változtatni tudjuk az elektronok sűrűségét. Belátható, hogy a sűrűség csökkentésekor a kinetikus energia gyorsabban csökken, mint a kölcsönhatásból adódó járulék, és extrém kis sűrűségeknél akár elhanyagolhatóvá is válik. Ilyenkor az elektronok térben lokalizálódhatnak a Coulomb-kölcsönhatás által megszabott szerkezetben. Mivel az elektronok egymást taszítják, minél távolabbra kell kerülniük egymástól. Rögzített elektronszám mellett ez egy szabályos kristályos szerkezetben lehetséges. Ez a Wigner-kristály.

A számolások szerint ez a kristályosodás olyan ritka elektrongázban valósulhatna meg, amilyenlél fémekben nem találunk. Hosszú kísérletezés után sikerült elektronok hélium felületére felvitt rétegében kimutatni a létezését. Könnyebb a feltevéleket teljesíteni félvezetőkben, ahol a nagy dielektromos állandó miatt gyengébb a Coulomb-taszítás, és a rács periodikus potenciáljában az elektronok úgy mozognak, mintha kisebb lenne a tehetetlenségük, az effektív tömegük. Még egyszerűbb a helyzet nagy mágneses térben, ahol a mágneses tér is korlátozza az elektronok pályájának kiterjedését. Egyre több kísérlet mutat arra, hogy félvezető szerkezetek felületi rétegében, ahol az elektronsűrűség könnyen szabályozható, erős mágneses térben sikerült az elektronokat kristályos szerkezetbe lokalizálni. Ugyanakkor ez egy sor új kérdést is felvet, mert erős mágneses térben a kölcsönható elektronoknak létezik egy másfajta, folyadékjellegű, különleges tulajdonságokat mutató állapota is. Azt, hogy a kettő közül melyik valósul meg, a külső körülmények finomhangolásával lehet szabályozni. A kétféle állapot versengése különösen izgalmassá tette, és az utóbbi években sok kutató érdeklődésének középpontjába emelte Wignernek ezt a jóslatát.

A cikk magyar vonatkozású érdekessége a 9. és 10. lábjegyzet, amelyek azt mutatják, hogy akkor milyen szoros volt Wigner kapcsolata Magyarországgal. A 9. lábjegyzet szerint a numerikus munka legnagyobb részét „Dr. M. Vermes of Budapest” végezte, vagyis *Vermes Miklós*, aki akkor a fásori evangélikus gimnázium –

Wigner egykori iskolája – tanára volt. A 10. pedig arra utal, hogy a munka folytatása a Magyar Tudományos Akadémia kiadványában fog megjelenni. Ez később valószínűleg elmaradt.

Wigner második princetoni doktorandusza *John Bardeen* (1908–1991) lett, aki villamosmérnöki végzettséggel a Gulf Oil Corporationnál dolgozott geofizikusként. Ez azonban nem elégítette ki, s ezért 1933-ban beiratkozott Princetonba, hogy matematikát és fizikát tanuljon. Wignerhez került diákként, aki azt a feladatot adta neki, hogy számítsa ki az egyszerű fémek kilépési munkáját, vagyis azt az energiát, ami ahhoz szükséges, hogy egy elektront eltávolítsunk a fémből. Egy közös cikkük jelent meg, amelyben első lépésként az elektron állapotának a felület közelében bekövetkező torzulása elhanyagolásával, de az elektronok közötti korrelációk figyelembevételével határozták meg a kilépési munkát. A felületi réteg hatását később Bardeen egy önálló munkában vizsgálta.

Bardeen 1936-ban szerezte meg a PhD-t. A Harvardra került, és ott kezdett el foglalkozni az elektronok és a rács rezgéseit megszabó elemi gerjesztések, a fononok kölcsönhatásával, amihez élete folyamán később többször is visszatért. 1945-től a *Bell* kutatólaboratóriumában dolgozott, majd 1951-ben Urbanába hívták, ahol akkor Seitz is tevékenykedett. Munkásságának, a szilárd testek fizikájá-



**A második doktorandusz,  
John Bardeen**

hoz való hozzájárulásának a részletezésére nincs szükség, hiszen ő nemcsak az egyik legeredményesebb szilárdtest-fizikus, de az egyik legismertebb is. Az egyetlen, aki két Nobel-díjat is kapott fizikából. Egyet

1956-ban *Walter Brattain*mal és *William Shockley*-val megosztva a tranzisztor felfedezésében játszott szerepéért, a másikat 1972-ben *J. Robert Schrieffer*-rel és *Leon N. Cooper*rel megosztva a szupravezetés elméletének kidolgozásáért.

Mielőtt rátérnénk Wigner harmadik doktoranduszára, célszerű egy posztdoktori munkatársáról és közös munkájukról szólni. A lengyel származású *Roman Smoluchowski* (1910–1996), aki 1935-ben Groningenben szerezte meg a doktorátust, 1935–36-ban egy évig posztdokként dolgozott Princetonban Wignerrel. A szimmetriák szerepének vizsgálata mindig kedvenc témája volt Wignernek. Éppen Amerikába érkezése idején jelent meg híres könyve a csoportelméletnek a fizikában, elsősorban az atomfizikában, az atomi spektrumok kvantummechanikájában való alkalmazásáról. A kristályos anyagok esetén a translációs szimmetria különös szerepet játszik. Ez teszi lehetővé, hogy az elektronok állapotát vagy a rács rezgési módusait hullámszámokkal jellemezzük, és diszperziós görbékkel szemléltessük. Az elektronok lehetséges energiaszintjeinek, az ún. sáv szerkezetnek a meghatározása a szilárdtest-fizika egyik nehéz, nagy számolási igényű feladata. Ennek megoldására az első komoly próbálkozás éppen a Wigner–Seitz-módszer volt. A kapott energiaértékekben sok egybeesést, ún. degenerációt tapasztaltak. Wigner Smoluchowskival és egy további munkatársukkal, *L. P. Boukaert*tel azt vizsgálta, hogy ezek az egybeesések mikor véletlenek, vagyis a közelítésből vagy a potenciál speciális megválasztásából adódnak, és mikor szükségszerűek, vagyis a kristály szimmetriájának a következményei. Ma is az általuk bevezetett, a csoportelmélet alapján történt osztályozást használjuk az állapotok jelölésére.

Smoluchowski hazament Lengyelországba, ahol a varsói egyetem fizikai intézetének vezetője lett, de a háború kitörésekor elmenekült. Miután kalandos úton visszakertült Amerikába, Wigner maga mellé vette Princetonba, ahol később a szilárdtest-fizikai és anyagtudományi program vezetője lett. Ő volt az Amerikai Fizikai Társaság Kondenzált anyagok divíziója első elnöke.

Wigner harmadik doktorandusza *William Conyers Herring* (1914–2009) volt. A Caltechről került 1934-ben Princetonba, és elsősorban az asztrofizika érdekelte. Itt ismerkedett meg a szilárdtest-fizikával, és lett egy évvel később Wigner diákja. 1937-ben írt cikkeiben, amelyekért a PhD-t megkapta, Wigner neve csak a köszönetnyilvánításban jelenik meg, mint aki a témát javasolta. Ez pedig a Boukaert–Smoluchowski–Wigner-cikkben tárgyalt



probléma – a véletlen vagy szükségszerű degenerációk megjelenése a sáv szerkezetben – folytatása volt. Egyrészt azt vizsgálta, hogy az időtükrözési szimmetria milyen következményekkel jár az elektronállapotok sáv szerkezetére, másrészt azt, hogy a véletlenül vagy szükségszerűen degenerált állapotok közelében hogyan viselkednek az energiaszintek.

A PhD megszerzése után Herring előbb az Massachusetts Institute of Technologyba került, majd a háború után a Bell Laboratóriumba, ahol létrehozta az elméleti csoportot. Végül 1978-ban Stanfordban az alkalmazott fizika professzora lett. Hozzá köthető az OPW-módszer, az ortogonális síkhullámok módszere megalkotása, ami jelentősen megkönnyítette a sáv szerkezet meghatározását. Igen jelentős volt a hozzájárulása a felületfizikához, a félvezetők transzporttulajdonságainak és a szilárd testek kollektív gerjesztéseinek megértéséhez.

A következő munkatárs *Hillard Bell Huntington* (1910–1992). 1941-ben szerezte meg a PhD-t, így talán nem Wigner volt a témavezetője, de 1935-ben együtt dolgoztak. Akkor írt cikkükben azt vizsgálták, hogy létezhet-e a hidrogénnek fémes módosulata. Tudjuk, hogy elég alacsony hőmérsékleten a hélium kivételével minden anyag megszilárdul. A hidrogén ugyan könnyebb a héliumnál, ezért a



A harmadik doktorandusz,  
Conyers Herring

kvantumfluktuációk, amelyek héliumban megakadályozzák a megfagyást, nagyobbak lehetnének a könnyebb atomokból álló hidrogénben, de a hidrogénatomok között a kölcsönhatás erősebb, mint a lezárt héjú hélium esetén, s ez megváltoztatja a feltételeket. Ha a szilárd fázisban hidrogénatomok ülnének egy egyszerű kristály rács pontjain, az szükségszerűen fém lenne. Valójában hidrogénmolekulák alkotnak rácsot, az pedig szigetelő lesz. Wigner és Huntington azt vizsgálta, hogy milyen nyomás esetén lehetne a fémes módosulat energiája alacsonyabb a molekulakristályénál. Számolásai szerint óriási, legalább 25 gigapascal (negyed millió atmoszféra) nyomásra lenne szükség ehhez. Ez a kérdés később is sokakat izgatott. Egy friss, 2016 őszi bejelentés szerint rendkívül nagy, 500 GPa nyomásnál sikerült fémes szilárd hidrogént előállítani, de a tudományos közönség erős fenntartással fogadta a hírt. Huntington később úttörő munkát végzett az elektromigráció területén, ami az integrált áramkörök technológiájában alapvető szerepet kapott.

Végül ugyancsak posztdokként dolgozott együtt Wignerrel *Gregory Hugh Wannier* (1911–1983). 1935-ben szerezte meg a doktorátust Baselen *Ernst Stueckelberg* vezetése alatt. 1936–37-ben csereprogram keretében egy évet töltött Princetonban. Megérkezésekor Wignert már jobban érdekelte a magfizika, de Wannier inkább a szilárd testek fizikáján kívánt dolgozni. Wigner a következő problémát javasolta. Kísérletekből ismeretes volt, hogy a szigetelő alkálihalogénidek optikai spektrumában van egy éles, erős abszorpcióra utaló ultraibó-

lya vonal. Ezt a *J. Frenkel* által adott atomi képből jól meg lehetett érteni, feltételezve, hogy az erős abszorpció akkor lép fel, amikor egy elektron a halogénionról átugrik az alkáliionra. Ez azonban ellenében látszott lenni a képpel, amely szerint az elektronállapotok szigetelőben is kiterjedtek. Wannier az 1937-ben megjelent cikkében megmutatta, hogy a kristályos anyag elektronállapotait a kiterjedt Bloch-függvényekkel történő leírással teljesen ekvivalens módon másfajta, térben lokalizált, az atomi állapotokhoz hasonló hullámfüggvénnyel is lehet tárgyalni. Ezeket nevezzük ma Wannier-függvényeknek. Ezek segítségével pedig azt is megmutatta, hogy az elektronok közötti kölcsönhatás szigetelőben újfajta állapotot, egy ún. excitonnívót hoz létre a vezetési és a vegyértékkötési sáv között, az egyszerű sávképből tiltott tartományon belül. Ezt úgy lehet elképzelni, hogy a vegyértékkötési sávból felgerjesztett elektron nem a vezetési sávba kerül, hanem a hátrahagyott lyukkal kötött állapotot alkot. Ezeknek az excitonnívóknak a létezése magyarázatot ad a megfigyelt abszorpcióra. A cikket Wannier egyedül írta, de a végén köszönetet mondott Wignernek a probléma felvetéséért.

Wannier Amerikában maradt a posztdoktori időszak után. Egy ideig a Bell Laboratóriumban dolgozott, majd az oregoni egyetemre került. Igen jelentős volt a hozzájárulása a szilárdtest-fizika sok területéhez.

Wigner, mivel nem véglegesítették, 1936-ban egy időre elhagyta Princetont. Madisonban, a wisconsini egyetemen kapott állást. Két év múlva tért vissza, amikor már végleges, teljes professzori állást ajánlottak neki. Ekkor egy cikk erejéig visszatért a szilárdtest-fizikához, az elektronok közötti kölcsönhatásnak a fémekben játszott szerepéhez is. A későbbiekben már nem találkozunk ilyen tárgyú cikkeivel. De a szilárdtest-fizikai témákban a harmincas évek derekán írt hét cikke és tanítványai, elsősorban első három doktorandusza, Frederick Seitz, John Bardeen és Conyers Herring – akiket ő vezetett be a szilárdtest-fizika kutatásába, az ott alkalmazandó modern módszerekbe – akkori és későbbi munkássága egyértelműen a modern szilárdtest-fizika atyjai közé emeli Wignert.

## Irodalom

*Out of the Crystal Maze, Chapters from the History of Solid-State Physics*, Edited by Lillian Hoddeson, Ernest Braun, Jürgen Teichmann, Spencer Wear, Oxford University Press, New York, Oxford, 1992.

### Wigner Jenő szilárdtest-fizikai tárgyú cikkei

- E. Wigner and F. Seitz, On the Constitution of Metallic Sodium, *Physical Review*, Vol. **43**, p. 804, 1933.
- E. Wigner and F. Seitz, On the Constitution of Metallic Sodium. II. *Physical Review*, Vol. **46**, p. 509, 1934.
- E. Wigner. On the Interaction of Electrons in Metals, *Physical Review*, Vol. **46**, p. 1002, 1934.
- E. Wigner and J. Bardeen. Theory of the Work Functions of Monovalent Metals, *Physical Review*, Vol. **48**, p. 84, 1935.
- E. Wigner and H. B. Huntington, On the Possibility of a Metallic Modification of Hydrogen, *Journal of Chemical Physics*, Vol. **3**, p. 764, 1935.
- L. P. Bouckaert, R. Smoluchowski and E. Wigner, Theory of Brillouin Zones and Symmetry Properties of Wave Functions in Crystals, *Physical Review*, Vol. **50**, p. 58, 1936.
- E. Wigner, Effects of the Electron Interaction on the Energy Levels of Electrons in Metals, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. **34**, p. 678, 1938.



ABONYI IVÁN

# Találkozás Wigner Jenővel Ericében

**A**kellemes emlékek újraéléséhez látszólag messziről kell elindulni. Ezért tisztelettel kérem a kedves olvasó jóindulatú türelmét.

1972-ben részt vehettem egy kutatóknak szóló nyári iskolán. Ebben az évben történt először, hogy az Olasz Fizikai Társulat kéthetes konferenciasorozatát rendezett Ericében a fizika különböző aktuális problémáiról. Az engem érdeklő konferencia a modern asztrofizika kérdéseivel foglalkozott. Az előzetes tervek szerint élvonalbeli csillagászok számoltak volna be a legújabb felfedezésekről, megfigyelésekről (ebben az időben állapították meg, hogy a Hattyú csillagképben a Cygnus X-1 röntgenforrás egy „fekete lyuk”, ami nagy szenzáció volt).

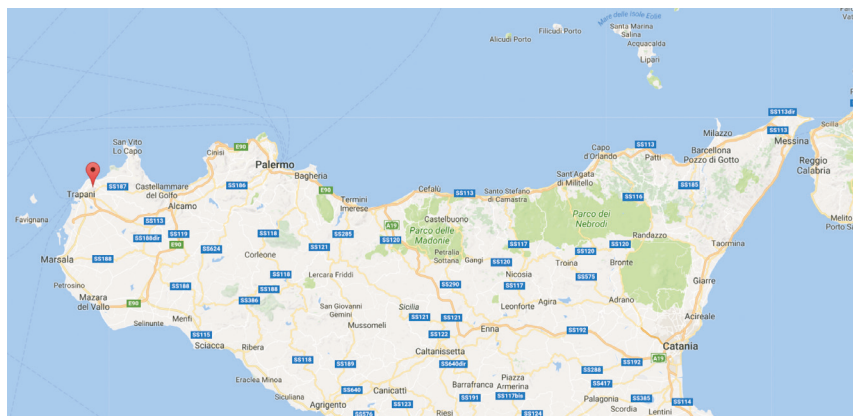
A programban nemcsak az általános relativitáselmélet idevágó modern eredményeiről terveztek előadásokat, hanem a plazmafizika (magnetohidrodinamika) aktuális problémáiról is érdekes beszámolókat ígértek. Csupán egy probléma volt számomra, aki lelkes érdeklődéssel azonnal jelentkezett a nyári iskolára, erre a konferenciára. Ez pedig az volt, hogy az „Il Nuovo Comento” című olasz (nemzetközi) szakfolyóiratban közölt hirdetés szerint ezt a konferenciát a NATO is támogatja. Ez akkor olyan körülménynek számított, ami akár meg is hiúsíthatna volna a várva várt kiutazást. (Érdekes megjegyezni, hogy akkortájt még a NATO pusztá emlegetése is halálos csapásnak bizonyult még a szakmai körökben is. Példa erre, hogy még az 1992-ben megjelent „Életrajzi lexikon A-tól Z-ig”, melynek kiadói között az MTA is szerepelt, a NATO-val kapcsolatos „személyekről” egyedül Kármán Tódorról közölt cikket, aki 1951-től kezdve a NATO repülésügyi kutató és fejlesztő intézményének, az AGARD-nak volt az elnöke, de pl. már mélyszélesen hallgatott egy másik magyar származású kutatóról, Wigner Jenőről, aki pedig még Nobel-díjas is volt.)

Az esetleges elutasítás tudatában azért mégis elkezdtem a kiutazás előkészítését, annál is inkább, mivel értesítettk az Olasz Fizikai Társulat, hogy elfogadták jelentkezésemet, sőt ösztöndíjas helyet is biz-

tosítottak. Úgy döntöttem, hogy az olasz hirdetés utolsó sorát a xerox-másolatból levágom – ez volt a NATO-támogatást rejtő információ – és úgy adom be a kérvényt. Ennek útja az Országos Ösztöndíj Tanácsra vezetett keresztül, ahol természetesen a „megbízható elvtársak”, párttag „kollégák” is véleményt mondtak. Hogy, hogy nem, a kiutazási kérelem mégis eljutott az MTA Külügyi Osztályához és megcsillant a remény, hogy most ki is jutok időben Ericébe. Így is történt, s amikor már a Rómába tartó repülőgépen ültem, csipkedni kezdtem magam, hogy

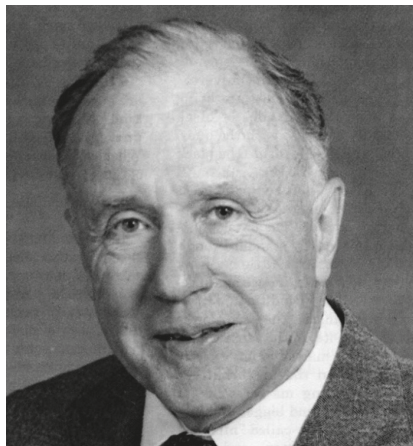
nem álmodik-e, most évek óta először, idejében ott lehetek már egy nyugati konferencia kezdetekor is.

Ericé Sziciliában van, a római repülőtéren át kellett szállni egy palermói járatra. Hamarosan szerencsésen megérkeztünk, de még kb. 50 km utazás várt rám, most már vonaton, de csak pár óra múlva. Tehát elvben volt idő Palermo megtekintésére. A város páratlan élményt jelentett e rövid idő alatt is. Megnéztem a híres dómot, a kínálkozó nevezetességek nagy részét, a normann szicíliai királyság sok évszázados emlékeit, de a nevezetes ma-



Ericé Szicília nyugati szélén található, Palermótól kb. 50 km-re, Trapani szomszédságában





**John Archibald Wheeler**  
(1911–2008)

gyarok, Türr István és Tüköry Lajos „nyomait” is. Hamarosan folytatni kellett az utazást, hogy a Trapani közelében fekvő, a sziget nyugati oldalán lévő, magas hegyre épült Ericébe eljussak. Ide végül siklóval lehetett feljutni. Megérkeztem, szeretettel fogadtak mint ösztöndíjast, elszállásoltak az egykori rendházból kialakított konferenciaközpontban. A következő két hét példátlanul érdekes élményekkel szolgált, értékes előadások, világhírű előadók, modern kutatási eredmények, nyitott kérdések, érdekes szakemberek a társak körében a világ úgyszólván minden tájáról és diskurzusok. Aztán elérkezett az utolsó előtti nap. Az egyik nagy kör alakú asztalnál ülök, ebédelünk, amikor megjelenik az iskola igazgatója, *John Archibald Wheeler* professzor. Minden kérdészködés nélkül egyenesen felém tart. Én persze, tudtam, hogy ki ő, bár természetesen még nem volt alkalmam találkozni vele. De ő a világ legtermészetesebb hangján így szól hozzám, mintha az „iskola” igazgatójaként régóta ismernék egymást. „Dr. Abonyi, üdvözlöm – kezdj – nem akarom megzavarni ebéd közben, csak azt a hírt hozom, hogy kedves barátom és kollégám, Wigner professzor meghívja önt ebéd után egy kávéra, hogy beszélgethessenek. Itt valahol, rémelem, lesz egy szabad asztal. Szóval, világos?! Akkor viszontlátásra!”

Wheeler professzor az akkori közelmúlt szakmai olvasmányaim nagy alakja volt. Egy időben Niels Bohr munkatársa (1934). Az atommagok folyamatának jeles kutatója volt. Később Bohrral közös tanulmányban leírták a maghasadás folyamatát a cseppmodell alapján. Az atombomba kidolgozásában is részt vett a II. világháború alatt (Manhattan-terv). A hidrogénbomba kutatásában is szerepet játszott. 1949-től kezdve viszont áttért a relativitáselmélet kutatására. Nevéhez fűződik a „Geometrodynamics” (1962), a „Gravitation Theory and Gravitational

Collaps” (1965) című könyv, a „fekete lyuk” fogalomkörének kidolgozása. E. E. Taylor és J. A. Wheeler közös munkája, a „Téridő fizika” 1974-ben jelent meg (aminek találkozásunk után a magyarra fordítását én végeztem). S ha már az 1972 utáni időknél tartok, legyen szabad még a korszakalkotó fontosságú könyvét, a „Gravitation” c. kötetet megemlíteni, ezt – A. J. A. Wheeler – K. Thorne – Ch. W. Misner írták (1973) – és a „Journey into Gravitation and Spacetime” (1999) c. munkára is felhívni a figyelmet.

És most térjünk át a várva várt pillanatra, a találkozásra Wigner professzorral! A megilletődött várakozás alatt eszembe jutott, hogy Wigner Jenő – angol publikációkban Eugen Paul Wigner – 1902. november 12-én született Budapesten (szüleimnek közeli kortársa). Édesapja egy újpesti börgyár tulajdonosa, aki fia tanulmányait – kezdetben – úgy irányítja, hogy az majd az ő örökebe lépjen. Ezért Wigner Jenő, aki a Fāsori Gimnáziumban érettségizik a legendás Rátz László matematikatanár növendékeként, a budapesti műegyetemen kezdi vegyészként tanulmányait, majd a berlini Technische Hochschule-ban szerez vegyész mérnöki diplomát és Polányi Mihálnál doktorál. Majd tényleg beáll édesapja gyárába (1925). De érdeklődését csakhamar nem elégíti ki a börgyár. Ezután a berlini Kaiser Wilhelm Institutban találjuk krisztallográfiai vizsgálatok közben (1926). Itt, Berlinben megismerkedik Werner Heisenberggel, Max Bornnal és David Hilberttel (1927). A berlini évek alatt rövidebb időnkig Princetonban is tanít, majd átmenetileg a Wisconsini Egyetem munkatársa (1936–1938), aztán visszatért Princetonba.

Közben behatóan foglalkozott spektroszkópiával. Ennek során Victor Weisskopf-fal közösen kidolgozták a színképvonal szélességének kvantummechanikai elméletét (1930). A spektroszkópiai vizsgálatok másik következménye az lett, hogy a deutérium és az alfa-részek kötési energiájának jelentős eltéréseiből megállapította: az atommagot alkotó protonok és neutronok között egy új típusú, rövid hatótávolságú ( $\sim 10^{-15}$ m) erőhatásnak kell működni, ami nem lehet gravitációs, természetesen nem lehet elektromágneses jellegű, hanem valami egészen más töltésfüggetlen erőhatás, amit bátran nevezhetünk magerőnek (1973). Mellesleg a színképvonalak tanulmányozása során felismerte a matematika csoportelméletének fizikai fontosságát és megírta a csoportelmélet feldolgozását fizikusok számára. Az első változat 1931-ben jelent meg „Gruppentheorie und ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren” (Vieweg, Braunschweig, 1931). Ez lett – egy későbbi, átdolgozott formában – a „Csoportelméleti módszer a

kvantummechanikában”. Ez a mű az elkövetkező időkben hallatlan fontosságra tett szert a fizikával foglalkozók körében.

Wigner professzor szívélyesen fogadott, a formalitások után (hol dolgozom, kik voltak a tanárim) pillanatok alatt a magyar költészet témáiban találtam magam. Persze, gondoltam, kb. 1938 óta nem járt Magyarországon és mégis milyen kristálytisztán beszéli nyelvünket és hogy emlékszik a XVIII–XIX. századi magyar versekre. Hamarosan páros szavalóverseny közepette éreztem magam. Őszintén csodáltam, hogy így emlékszik a versekre, Kölcseyre, Vörösmartyra, főleg Arany Jánosra. Egyáltalán nem bántam, hogy nem a tudományos eredményeiről volt szó, hanem láthattam, hogy mennyire jól éri magát egy magyar partnerrel a társaságban. De ennek is vége lett egyszer, a mintegy másfél órás „szavalóverseny” után. Én másnap hazautaztam élményektől duzzadó fejjel, ő a következő nyári iskolakonferencia igazgatójaként Ericében maradt.

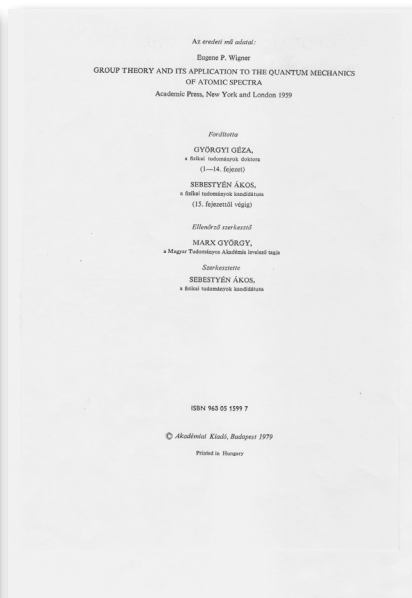


**Wigner Jenő (1902–1995)**

Itthoni bűvárkodásom során megtudtam, hogy Wheeler és Wigner professzorok között e véletlenszerű ericei találkozón, mely még a baráti, kollegiálison túlmenő kapcsolat van. Wigner Jenő első felesége, Amelie Frank elhunyt (1937) után 1941-ben feleségül vette Mary Annette Wheeler fizikusprofesszort, Wheeler névrokonát. Házasságukból David és Martha nevű gyermekei születtek, s a fiúban folytatódott a matematika iránti fogékonyság.

Wigner Jenő hosszú élete (1902–1995) során az eddigi említettek kivül még rengeteg sok téren alkotott maradandót pl. a szilárdtestek fizikájában. A magfizikai eredményei – a magerő felfedezése – után a magfizikai héjmodell kimunkálá-





**Wigner Jenő: Csoportelméleti módszer a kvantummechanikában. Fordította: Györgyi Géza (1–14. fejezet), Sebestyén Ákos (15–27. fejezet és függelékek). Az eredeti mű: Eugen Paul Wigner: Group Theory and its Application to the Quantum Mechanics of Atomic Spectra, Academic Press, New York and London, 1959. A fordítást Györgyi Géza hirtelen bekövetkezett elhunya miatt nem tudta befejezni. Bemutatjuk a címlapot és az első oldalt.**

sában lényeges szerepet játszott. Erről is szólt „Nuclear Structure” c. kötete (University, Princeton, 1958). Ezért történt az, hogy Maria Goppert-Mayerrel és J. H. R. Jansennel együtt megosztott Nobel-díjat kapott 1963-ban „az atommagok és az elemi részek elmélete terén, különösen pedig az alapvető szimmetriaelvek felfe-



**Wigner Jenőnek Mary Anette Wheeler professzorral (aki nem rokona J. A. Wheelernek) kötött házasságából David és Martha nevű gyermekei születtek**

dezésével és alkalmazásával elért eredményeier”. (Ez utóbbi szakasz utalás a csoportelméleti munkásságra.) Közismert szerénységére jellemző, hogy erről az esetről a következő megjegyzést tette: „Nem gondoltam volna, hogy valaha is úgy közlik a nevemet az újságok, hogy nem tettem semmi komiszat.”

A Princetoni Egyetemen dolgozott, kisebb-nagyobb megszakításokkal. Különösen fontos, hogy szerzeágazó tevékenységei közül kiemeljük, milyen fontos szerepet játszott vegyész-mérnök-fizikusként az atomreaktorok terén. (Az atomfegyverek kidolgozásában is fontos eredményeket ért el, de azok bevetése ellen tiltakozott.) Érdekes történet, amikor mérnöki tudását is felhasználva hatalmas magfizikai ismeretei mellett, részt vett Enrico Fermivel (1901–1954) az első energiatermelő atomreaktor konstrukciójában a reaktor elindítását és sikeres működését megünnepeleldő Fermit egy üveg Chianti borral ajándékozta meg (ami akkortájt az importkorlátozások miatt ugyancsak nagy szó volt).

Wigner az atomenergia-program békes céljainak nagy úttörője volt, az atomfegyverek bevetését ellenezte, de a biztonság elérése, az atomháború megelőzése érdekében mégis részt vett a kutatásban. Ezért mint nagy és komplex ismeretekkel rendelkező szakembert sokáig foglalkoztatták a magfizikai hadi alkalmazásokban. A NATO magas rangú szakmai tanácsadói szerepével bízták meg. (Ezért nem szerepelhetett a magyar lexikonokban, csak az enyhülés évei után.)

Legismertebb közérdeklődésre alkalmas tanulmánykötete a „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences.”

Időközben megtörni látszott a tagadás taktikája: Wigner Jenő több műve is rendre hozzáférhetővé vált magyar nyelven. 1972-ben megjelent a Gondolatnál pl. a „Szimmetriák és reflexiók” c. kötete.

A mintegy fél évszázadnyi távollét után, a magyarországi rendszerváltozás előszelének köszönhetően, 1976-ban az Eötvös Loránd Fizikai Társulat meghívására hazalátogatott. A következő évben ismét a Társulat vendége volt, ekkor választották az ELFT tiszteleti tagjává. Majd 1983-ban Pakson járt, az Atomerőműben. 1987-ben megkapta az ELTE tiszteletbeli díszdoktori címét és a Magyar Népköztársaság Zászlórendje kitüntetését, és 1988-ban az MTA tiszteletbeli tagjává választotta.

Wigner Jenő, ez a nagy tudású, fantasztikusan tevékeny, de végtelenül szerény ember 1995-ben hunyt el. Emlékét megőrzendő a Központi Fizikai Kutató Intézetet róla nevezték el Wigner Fizikai Kutatóközpont (Wigner Research Center).

A XX. század eme nagy fizikus egyéniségének emlékét tisztelettel megőrzi az utókor, a magyar tudományos élet. Ennek állomásai: Magyarország NATO-tag lett 1999-ben, Wigner Jenőről bélyeg készülhetett ugyanebben az évben. 🇮🇪

## Irodalom

A szerzeágazó és gazdag irodalomból ez a jegyzet nem tud teljességre törekedni. Wigner Jenővel kapcsolatos magyar nyelvű könyvekből itt csak mutatóban nyújtunk be egy válogatást.

Eisenbud, L. – Garvey, G. T. – Wigner, E. P.: Az atommag szerkezete Fordította: Györgyi Géza Akadémiai Kiadó, Bp. 1969.

Wigner Jenő: Csoportelméleti módszer a kvantummechanikában. Fordította: Györgyi Géza és Sebestyén Ákos. Akadémiai Kiadó, Bp. 1979.

Wigner Jenő: Szimmetriák és reflexiók (Wigner Jenő tudományos esszéi). Fordította: Györgyi Géza Gondolat Kiadó, Budapest, 1972.

Wigner Jenő: Válogatott írások. Typotex, Bp. 2005.

Francis S. Wagner: Wigner Jenő, az atomkor egyik megalapítója. Studia Physica Saavaria, IV. 1998 (A kötetben gazdag irodalomjegyzék is található Wigner Jenő könyveiről és cikkeiről)

Kovács László: Wigner Jenő és tanárai. Habilitationes Savarienses, Szombathely, 2002

Kovács László: Györgyi Géza: Egy kivételes elméleti fizikus életpálya. Magyar Tudománytörténeti és Egészségtudományi Intézet, Budapest, 2016. (A kötetben található Györgyi Géza és Wigner Jenő levelezése.)

SOLT GYÖRGY

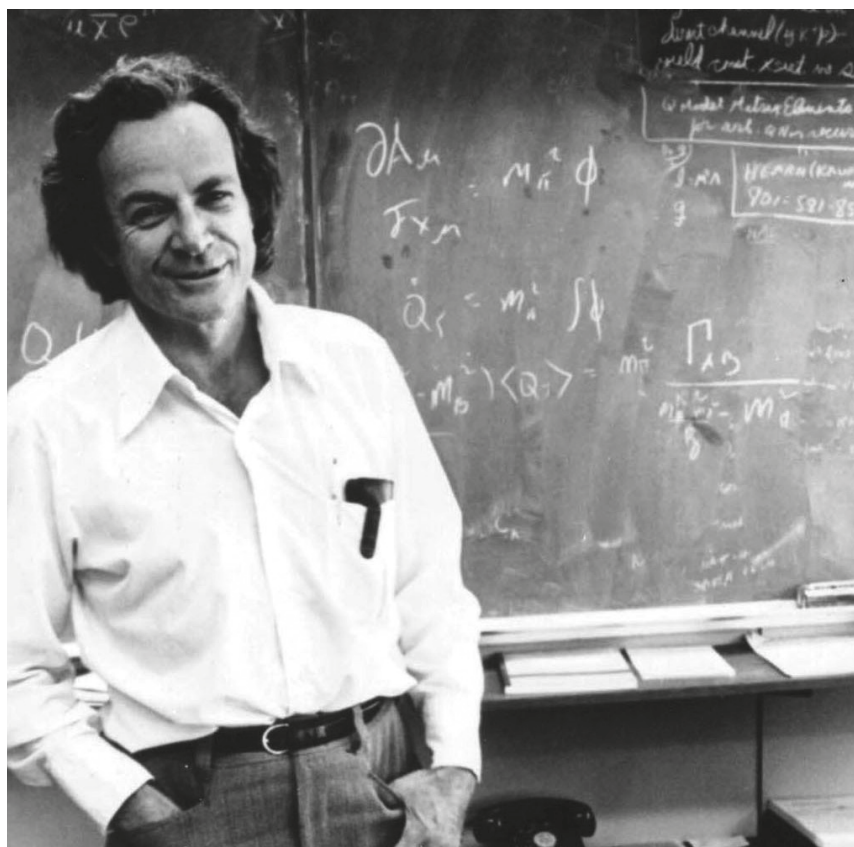
# Matematika és a természet- tudományos megismerés

*A matematika hosszú története mutatja, hogy gondolatok, melyek először csak komolytalan fantázia-szüleményeknek tűntek, végül is alkalmasnak bizonyultak egy sor valóságos, fontos probléma megoldására.*  
(S. Ulam)

A matematika óriási hatékonysága a természettudományokban rejtély, amire nincs racionális magyarázat”, állapította meg *Wigner Jenő* 1960-ban megjelent írásában [1], amely – talán éppen ez volt a célja – tudományos körökben élénk visszhangot váltott ki. Tanulmányában *Wigner* kifejti, mennyire nehéz vagy éppen lehetetlen meggyőző magyarázatot adni arra, hogy az *emberi képzelet* alkotta, elvont fogalmakat és konstrukciókat használó matematika „meghökkenítően” jól alkalmazható a valóság, a természet leírásában. A fizikus *Feynman* szerint is „teljesen elképesztő, hogy a matematikával előre meg lehet mondani, mi fog történni a világban, pedig a matematika olyan szabályokat követ, melyeknek *semmi közük* ahhoz, ami a valóságban végbemegy” [2].

Valóban elképesztő? Hiszen a korai geometria és aritmetika elemi fogalmai (számok, formák) eredetileg jórészt éppen a valóság megfigyelésén alapultak. Az is igaz, hogy a matematika több területén később is – a XIX. századi matematikus-fizikus *Fourier* szavaival – „a természet vizsgálata a matematikai felfedezések legtermékenyebb forrásának” bizonyult. (Például *Newton* a gravitáció és a mechanika vizsgálata során alkotta meg a differenciál- és integrálszámítást). Akkor miért ne lenne alkalmas a matematika ma is a valóság leírására?

Azért, állítja *Wigner*, mert a modern matematika fogalmait a kíváncsi matematikus képzelete már régóta *egyedül* azzal a céllal alkotja, hogy ezek a fogalmak és a velük ötletes műveletek segítségével felépített struktúrák *matematikai értelemben szépek*, tehát érdekesek, általánosak, gondolatébresztők legyenek (*Wigner Polányi Mihályt* idézi: „a matematika legnyilvánvalóbb vonása az, hogy érdekes”). Joggal található



**Elképesztő, hogy a matematika megmondja, mi fog történni a világban... (Richard Feynman)**

tehát meglepőnek nemcsak a laikus, de a Nobel-díjas fizikus is, hogy egy csupán „tisztá” matematikai szempontból érdekesnek és szépnek ítélt gondolati konstrukció alkalmas lehet, mégpedig sok esetben láthatóan *egyedül* alkalmas arra, hogy megvilágítsa az atomok vagy égitestek világában, tehát a *valóságban* lejátszódó jelenségek törvényszerűségeit. És azt még inkább, hogy a „szép” for-

mula felfedezéseket is megjósolhat. Az elektromágneses hullámok létezését előrejelző Maxwell-egyenletekről például a felfedező *H. Hertz* így ír: „... elkerülhetetlenül úgy érezzük, hogy ezek a matematikai formulák önállóan léteznek..., hogy okosabbak még felfedezőjüknél is, és hogy többet nyerünk ki belőlük, mint amennyit szerzőjük eredetileg beléjük tett” [3]. Az elemi részek fizikájában



nem is egyszer ugyancsak a „formula” jósolt meg hiányzó, később felfedezett új részecskéket.

Egy matematikai érdekességéért konstruált, de végül a modern fizikában is már nélkülözhetetlen fogalom példaként említi Wigner a komplex számokat. A gondolat a reneszánsz kori olasz matematikus, *Bombelli* fejében született. Bombelli az algebra harmadfokú egyenletének (tehát a „tisztá matematika” egy belső problémájának) vizsgálatakor jutott arra a „vad gondolatra”, hogy a megoldás érdekében érdemes a valós számok mellett új, *képzetes* számokat is *elgondolni*, amelyek ugyan négyzetre emelve negatív eredményt adnak, és ezért nyilvánvalóan „álságosak, haszontalanok”, de emellett mégis érdekesek és szépek, mert velük már minden négyzetgyökvonás elvégezhető, és ráadásul éppúgy lehet összeadni, szorozni, osztani őket, mintha „rendes” számok lennének. A kíváncsiságból, intellektuális játékból kitalált, képzetes részt is tartalmazó (komplex) számok tették lehetővé a matematikában nagyjelen-



Az univerzum könyve a matematika nyelvén íródott...  
(Galileo Galilei)

tőségű komplex analízis megalkotását. De a komplex számok idővel a fizikában is fontossá, sőt nélkülözhetlenné váltak. Mégpedig nem csak mint „alkalmazott

matematikai” segédeszközök, mert *alapvető* szerephez jutottak a mikrovilág jelenségeit leíró kvantumfizikában: komplex számok nélkül a kvantumelmélet egyáltalán nem létezhetne.

Hasonló a helyzet a Wigner által (nyilván szerénységből nem említett) csoportelmélettel, melynek a modern fizikában elfoglalt helyét jórészt éppen az ő munkái jelölték ki. A csoportelmélet megalkotása a XIX. század első harmadában élő matematikus, *Galois* nevéhez fűződik, aki ennek segítségével megtalálta az algebrai egyenletek megoldhatóságának századok óta intenzíven keresett, általános feltevéletét. Ezzel az ötöd- és magasabb fokú egyenletek kérdése megoldódott, de az elmélet a matematika több más területén is fontosnak bizonyult. És nemcsak ott, hanem a modern fizikában is: a Lorentz-csoport alapvető fogalom a relativitáselméletben, a csoportelmélet szükséges az atomspektrumok megértéséhez, nélkülözhetetlen eszköz a molekularezgések osztályozásában, a kondenzált anyag szerkezetének, dinamikájának és fázisátalakulásainak vizsgálatában, az elemi részek fizikájában egyaránt.

A tiszta matematika egy érdekesnek látszó kérdése inspirálta Galois kortársát, a matematikus-fizikus *Hamilton* is: lehet-e a komplex számoknál is „komplexebb”, de algebrailag hasonló szép rendszert alkotó számokat konstruálni. Lehet, és *Hamilton* meg is találta a már négydimenziós *kvaterniókat* és a közöttük fennálló különös műveleti szabályokat, megalkotva ezzel az újszerű, mert nem-kommutatív kvaternió-algebrát (ahol az eredmény a szorzótényezők sorrendjétől is függ). *Hamilton* aligha gondolta, hogy csupán matematikai érdekességének tekintett felfedezésének és a később megtalált hasonló algebrai struktúráknak közül lehet a fizikai valósághoz, mégpedig éppen az akkor még ismeretlen, de nagyon is valóságos *elektronok* viselkedéséhez. Csak nyolc évtizeddel később, a fizikus *Pauli* és *Dirac* munkái mutatták



A matematika óriási hatékonysága rejtély... (Wigner Jenő)

meg, hogy azok a matematikai objektumok (kvantumfizikai operátorok), melyek az elektronspin (perdület) atomi spektrumokban látható viselkedését jellemzik, éppen ilyen nem-kommutatív algebrát valósítanak meg.

A matematika fogalmainak, módszereinek a csillagászatban, fizikában tapasztalt egyedülállóan sikeres alkalmazhatóságát már *Kepler*, *Galilei* és *Newton* is lenyűgözően csodálatosnak, de ugyanakkor *természetesnek* is tekintette. Hiszen *Galilei* szavaival: „... az univerzum [könyve] a matematika nyelvén íródott, ... ennek a nyelvnek az ismerete nélkül egy szót sem értünk belőle”. A kulcsszó az *íródott*: a teremtésben hívő tudós számára az egész matematika már eleve létezik, *beleírva* az univerzum jelenségeibe, a szerencsés kutató csak *rátalál* ezekre a természetben már meglévő matematikai formulákra. A megtalált természeti törvények matematikai szépsége és egyszerűsége (a bolygópályák szabályos ellipszisei, az általános tömegvonzás törvénye) csak megerősítették őket ebben a hitben. „Milyen megnyugtató látni ezeket az oly szép és egyszerű törvényeket”, lelkesedett például a newtoni mechanikát továbbfejlesztő matematikus-fizikus *Maupertuis*, „ezek talán az egyedüli törvények, melyeket a dolgok teremtője alkotott azért, hogy működésben tartsa látható világunk valamennyi jelenségét”.

*Maupertuis* ezt bizonyára kielégítő válasznak tekintené *Feynman* bevezetőben idézett szavaira. A matematika és a természettudományok kapcsolatát egy ilyen (mai szóval) „intelligens tervezőre” visszavezető magyarázatait a csilla-

gász-fizikus *Jeans* a múlt század elején röviden így foglalta össze: „az univerzum Nagy Építészé nyilvánvalóan matematikus”.

Ha azonban nem feltételezünk univerzumunkat megalkotó intelligens tervezőt, újra kell gondolnunk a természeti jelenségek és a leírásukra mindeddig jól bevált ember alkotta matematika „elképesztően” szoros viszonyát. Mert a teremtés dogmájától eltekintve is úgy tűnhet, hogy a matematika (a kortárs fizikus *Dyson* idézve) „bele van szöve” az univerzum anyagába. Ez a benyomás különösen erős akkor, amikor a matematika előresiet, amikor már jó előre készen áll az a matematikai fogalom vagy struktúra, ami egy későbbi fizikai felfedezés magyarázatához szükséges lesz. A kvantumfizika megalkotói, *Heisenberg*, *Born*, *Dirac* elő tudták venni a matematika meglévő fogalomtárából a számukra fontos mátrix-algebrát, *Einstein* is készen kapta az előző évszázad matematikájától az általános relativitáselmélet megalkotásához nélkülözhetetlen analitikus eszközt, a görbült terek differenciálgeometriáját. A fizikus *Weinberg* hasonlatával: „szinte kísérteties, amikor a fizikus észreveszi, hogy a matematikus már ott járt... olyan ez, mintha az űrhajóból kilépő *Armstrong* már ott találta volna a Hold poros talaján [a holdutazást megálmodó] *Verne Gyula* lányomát” [4].

Míthogy a matematikával „az esetek bámulatosan nagy részében elképesztő pontossággal írható le a jelenségek egész osztálya, nehéz elkerülni azt a benyomást, hogy itt egy csodával állunk szemben”, olvassuk Wignernél. Aki ugyanakkor mégis felvet néhány gondolatot, melyek megkérdőjelezhetik ennek a benyomásnak a jogosultságát, illetve segíthetnek megérteni, miben rejlik a matematika gyakran csodának tűnő alkalmazhatóságának magyarázata. A hatékonyság benyomása például illúzióknak tűnhet, ha meggondoljuk, hogy a matematika hatalmas épületének csak nagyon kis része az, amelyik eddig a természeti törvények megfogalmazásában alkalmazást nyert. Ráadásul ezt a viszonylag kevés matematikai konstrukciót sem véletlenül választja ki a fizikus, hanem gyakran már maga is önállóan eljutott a megfelelő formulához (ahogyan *Heisenberg* is a mátrix-műveletekhez), és csak utólag tudja meg, hogy ez a matematikában jól ismert. Tény az is, hogy egy megtalált természeti törvény általában csak korlátozott érvényű közelítés, a pontosabb adatok birtokában módosításra, kiegészítésre szorul vagy újjal pótolandó.

A Wigner által felvetett tudományfilozófiai kérdésre időközben fizikusok, tudománytörténészek, filozófusok keresik a választ. Egy matematikus-fizikus konferencián pél-

dául *Weinberg* megemlíti a rendkívüli hatékonyság „naturalista” magyarázatát [4]: „mivel a matematikus ezen a világon él, tudatosan és nem tudatos módon is állandóan érzékeli, hogyan működik a világ, és amikor dolgozik, ezek a nem-tudatos tapasztalatok mélyen befolyásolják”. Személyesen azonban úgy véli, hogy ezt így általánosan nehéz elfogadni, például „igazán nehéz átlátni, hogy *Galois* csoportelméleti munkája hogyan nőtt ki bármilyen olyan tapasztalatból, melyet ő az univerzumban uralkodó fizikai törvényekről szerzett”. Ezért egy másik érvelést is vázol: a fizikában megis-



Ezek a matematikai formulák önállóan léteznek... (*Heinrich Hertz*)

mert természeti törvények bizonyos egyszerűséget, szimmetriákat, rendezettséget mutatnak, és mivel a matematika egyebek között éppen a különféleképpen rendezett struktúrák tudománya, valószínű is, hogy a matematikus (*Wigner* által is hangsúlyozott) *nagyszámú* struktúrája közül némelyik éppen ráillik arra, amit a fizikus természeti törvényként tapasztal.

A tudományfilozófus *Mark Steiner* éppúgy, mint *Wigner*, csodálnivalónak tartja a matematika hatékonyságát a természet-leírásban, de ennek okát nem a külvilág emberi gondolkodást befolyásoló hatásában látja [5]. Szerinte ez a hatékonyság inkább annak a jele, hogy világunk éppen egy olyan univerzum (a sok elképzelhető közül), amelyik fizikai tulajdonságait tekintve barátságos (*user-friendly*) az emberi megismerés számára: „amit mi szépnek és hasznos szellemi alkotásnak tartunk, ott található megvalósulva a természetben”.

(Hasonlóan „emberszempontú”, *anthropic* érvelés a kozmológiában a *fundamentális természeti állandók* (elemi töltés, fénysebesség) értékével kapcsolatban merült fel először. Mivel a fundamentális állandóknak a megváltoztól csak *alig eltérő* értékei esetén szerves molekulák, tehát élet sem jöhetett volna létre, nem kétséges, hogy „finoman hangolt” állandóival a mi univerzumunk az ember számára valóban egyedülálló módon barátságos.)

*Wigner* szerint a különböző teológiai, metafizikai, a gondolkodást befolyásoló külső tényezőkre vagy véletlenre hivatkozó érvelések nem változtatnak azon a tényen, hogy meggyőző természettudományos, *racionális* magyarázat híján a matematika hatékonysága a fizikus számára rejtély maradt. Márpedig a XX. század fizikájában, elsősorban a kvantumelméletben megjelenő rendkívül absztrakt matematikai konstrukciók (operátor-algebra, függvényterek) sikeres alkalmazása különösen aktuálissá teszi, hogy ezen a rejtélyen elgondolkozzunk.

Ezt a meggyőződést fejezi ki *Wigner* tanulmányának egyébként száraz tudományos nyelven írt szövegében a szokatlanul személyesnek ható, óvatosan optimista végkövetkeztetése: „A matematika alkalmassága a fizikai törvények megfogalmazására olyan csodálatos ajándék, amit nem értünk és nem is érdemlünk meg. Legyünk hálásak érte, és reméljük, hogy ez [a hatékonyság] a jövőben is megmarad, és örömünkre vagy éppen elképedésünkre kiterjeszhető lesz az emberi megismerés más területeire is.”

A cikk a szerzőnek a *Természet Világa* 2017. májusi számában megjelent „Miért tudják az elektronok a matematikát?” című írása alapján készült.

## Irodalom

- [1] A matematika meghökkentő hatékonysága a természettudományokban, *Wigner Jenő* válogatott írásai, szerk. *Ropolyi László*, Typotex, 2005.
- [2] *R. P. Feynman*, A fizikai törvények jellege, Akkord, 2005.
- [3] idézi *F. J. Dyson* in *The Mathematical Sciences*, ed. National Research Council, M.I.T. Press 1969.
- [4] *S. Weinberg*, Notices of the American Mathematical Society, 33.5, 1986.
- [5] *M. Steiner*, The Applicability of Mathematics as a Philosophical Problem, Harvard University Press, London 1998.



KONIORCZYK MÁTYÁS – KISS TAMÁS – ÁDÁM PÉTER

# Wigner-függvények a kvantumoptikában

Wigner Jenő kutatói pályájának kezdete egybeesett a modern kvantummechanika elméletének megszületésével. Wigner 1925-ben fejezte be tanulmányait és szerezte meg doktorátusát Berlinben a Technische Hochschulén, ugyanabban az évben, amikor Werner Heisenberg híres, a mátrixmechanikát bevezető cikke megjelent. A következő években az idős Hilbert asszisztenseként dolgozott Göttingenben, majd 1930 és 1933 között megosztotta az idejét Princeton (USA) és Berlin között. Ezekben az években sok jelentős hozzájárulást tett a kvantummechanika elméleti megalapozásához. Közöttük van a klasszikus statisztikus fizikát és a kvantummechanikát hasonló matematikai alapon tárgyaló Wigner-függvény bevezetése. Írásunkban megkíséreljük bemutatni a Wigner-függvény elméleti hátterét és az utóbbi évtizedekben a kvantumoptikában játszott jelentős szerepét.

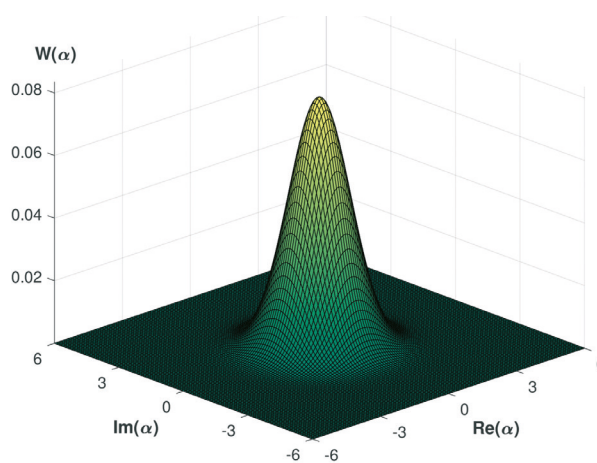
A fizika egyik fő feladata a jóslás. Milyen kezdősebességgel és milyen irányban kell egy billiárd- vagy egy puskagolyót elindítani, hogy a kívánt helyre érkezzen? Newton törvényei alapján, ha egy pontszerű test egy egyenes mentén mozoghat, és a rá ható erőket ismerjük, akkor egy adott időpontbeli helye és impulzusa (lendülete) ismeretében meghatározhatjuk, hogyan fog mozogni a továbbiakban, vagy más szóval egy adott idő után hol lesz és milyen sebességgel halad éppen. A mozgásállapot ismerete tehát azt jelenti, hogy minden időpillanatban ismerjük a test helyét és impulzusát, ami a példában szereplő esetben két számmal megadható. Ezt a szám-párt ábrázolhatjuk a síkban úgy, hogy az egyik (pl. vízszintes) koordináta a hely legyen, a másik (pl. függőleges) pedig a lendület: ekkor a sík minden pontja egy lehetséges mozgásállapot. A síkot ekkor *fázistérnek* nevezzük. Ha a test térben mozoghat, már nehezebb elképzelni a fázistert, mivel három koordináta adja meg a helyet, az impulzusnak pedig szintén három komponense van (vagyis a rendszernek három szabadsági foka van), az ábrázoláshoz már hat független irány kell, a fázistér tehát hat dimenziós. Ha több, mondjuk  $N$  darab,

pontszerű test mozog a térben, egyenesen  $6N$  dimenziós teret kell használnunk, amit elképzelni nyilván nem tudunk, de használata sok előnnyel jár: ilyenkor a teljes rendszer mozgásállapotát egyetlen pont pontosan leírja.

Ha valamilyen okból nem tudjuk a rendszer pontos állapotát, ami a *statisztikus fizikában* jellegzetes eset, akkor az állapot helyett csak a különböző állapotok valószínűségét adhatjuk meg: egy fázistérbeli *valószínűsűrűség-függvényt*. Ebből az egyes szabadsági fokok valószínűsűrűség-függvénye is meghatározható.

A fázistér azonban nem csak tömegpontok, pontrendszerek esetén hasznos megközelítés. A fénycsillámok kapcsán általában a hullámok térbeli leírása az adott geometria (pl. lézer rezonátor-üreg, haladó fénycsillámok) alapján meghatározható módusfüggvényekkel történik. A módusfüggvények a klasszikus Maxwell-egyenletek megoldásai, amelyek kielégítik a határfeltételeket és polarizációs tulajdonságaik is rögzítettek. Ha ezeket meghatároztuk, minden egyes ún. módushoz már csak az időbeliséget kell tárgyalni, ami matematikailag azonos egy pontszerű, vonal mentén adott frekvenciával rezgő test tárgyalásával, ahol a hely és az impulzus szerepét a módus úgynevezett *kvadratúrái* töltik be, mint mérhető mennyiségek. A módushoz tartozó két kvadratúrát gyakran egy komplex szám valós és képzetes részének tekintik, ez a fénycsillám komplex amplitúdója. A komplex amplitúdó (ez általában *görög alfával* jelöljük) abszolút értékének négyzete a fénymódus energiája, ami arányos a fény in-

tenzitásával. A sok módusú fény sok szabadsági fok leírására vezethető vissza. A fázistér használata ebben is hasznosnak bizonyul, ilyenkor egy módus fázistérét azonosíthatjuk a komplex számok síkjával.



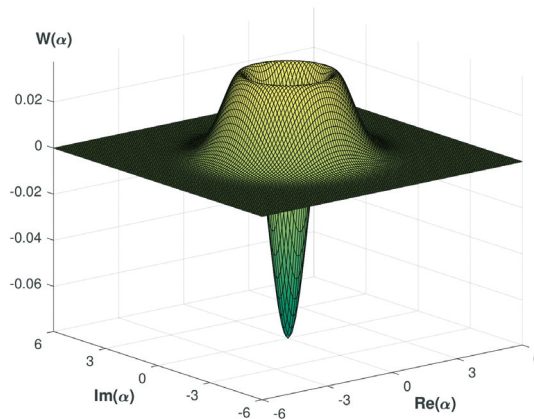
1. ábra. A vákuum Wigner-függvénye a fázistérben

A XX. század korszakalkotó felfedezése, a kvantummechanika, megváltoztatta a fizikában addig általánosan elfogadott determinisztikus világgépet. A véletlen jelenségeket korábban inkább pontatlanságból eredő bizonytalanságnak tekintették, azonban a Max Born által javasolt szabály szerint a rendszert legjobban leíró hullámfüggvény csak mérési eredmények valószínűségét tudja megjósolni. Wigner Jenő közvetlenül a kvantummechanika alapösszefüggéseinek kidolgozása után, 1932-ben javasolt egy matematikai képletet egy fázistérben értelmezett függvényre [1], amelyről lábjegyzetben megjegyezte, hogy „E matematikai kifejezést Szilárd Leó és a jelen szerző közösen találták néhány évvel ezelőtt, más célból.” A javasolt függvényt később Wignerről nevezték el, bár ő élete végéig szerényen tiltakozott nevének ilyen használata ellen. A Wigner-függvény nagyon hasonlít egy fázistérbeli valószínűsűrűség-függvényre. Egy pontszerű, egy dimenziós potenciálban mozgó részecske esetén a szokásos módon szá-

mítható ki belőle annak a valószínűsége, hogy a részecske egy adott hely közelében tartózkodik (görbe alatti terület, egy vertikális végtelen sávban), vagy, hogy egy adott impulzusérték körül van a lendülete (görbe alatti terület egy horizontális végtelen sávban). Ha azonban az előbbi két kérdést egyszerre tennénk fel, akkor a két sáv metszetét alkotó kis téglalapban kellene megkeresnünk a görbe alatti területet. Ekkor azonban egy matematikainak tűnő problémába ütközünk: a Wigner-függvény lehet negatív is, ezáltal pedig egy megfelelően kicsi téglalapot kiválasztva a görbe alatti terület is negatív lesz. Vagyis, ha egyszerre szeretnénk nagyon pontosan rákérdezi a részecske helyének és impulzusának az értékére, akkor ellentmondásra jutunk. A kvantummechanikában ez egy jól ismert jelenség, ugyanezt fejezi ki a Heisenberg-féle határozatlansági reláció: a kvantummechanika nem enged meg olyan eljárást, amivel egy részecske helyét és impulzusát egyszerre nagyon pontosan megmérhetnénk. Ugyanakkor, ha szélesebb sávokat választunk, vagyis megfelelően nagy bizonytalanságot engedünk meg a hely illetve az impulzus mérésekor, akkor az így keletkező nagyobb téglalapon a Wigner függvény negatív és pozitív részei kiegyenlítik egymást és összességében pozitív görbe alatti területet kapunk. Ez összhangban van azzal, hogy a Heisenberg-féle határozatlansági reláció nagyobb bizonytalanságú közös hely- és impulzusmérést már megenged, egy ilyen mérés eredményének a valószínűségét adja meg az előbbi szám.

Az egyik legegyszerűbb, érdekes fizikai rendszer a harmonikus oszcillátor. Például, ha a kitéréssel arányos visszatérítő erő hat egy tömegpontra, mondjuk egy rugóra erősített testre, amikor egyensúlyi helyzete körül rezeg. A rezgő elektromágneses mező, így a fény egy módusát is egy harmonikus oszcillátorral írhatjuk le általános esetben szabad térben. Ilyenkor a hely és a lendület szerepét a kvadraturák veszik át. A következőkben vizsgáljuk meg néhány érdekes állapot Wigner függvényét. Az **1. ábrán** a vákuum Wigner függvénye látható: egy harang alakú görbe. A kvadraturák mérésekor tehát véletlen értékeket kapunk, átlagosan nulla intenzitásértékkel, de jól meghatározott zajjal mindkét kvadraturában. Hasonló, véletlen zajjal rendelkező klasszikus statisztikus állapotot is el tudunk képzelni. Ugyanakkor a klasszikus fizikához szokott észjárással meglepő, hogy a vákuumban sem pontosan nulla a mennyiségek értéke: itt is jelen van az említett zaj: az úgynevezett vákuum-fluktuáció. A lézerefény kvantumállapota egy hasonló harang alakú függvény, de már nem a nulla amplitúdóérték körül:

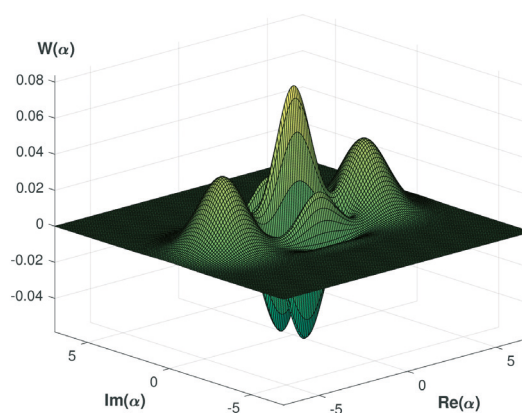
középpontja éppen a fény komplex amplitúdója. Ez az ún. koherens állapot, amely még mindig értelmezhető klasszikusan is. A következő, **2. ábrán** az egyfoton állapot Wigner-függvényét ábrázoltuk. (Ez a



**2. ábra.** Egy foton Wigner-függvénye

fény azon kvantumállapota, amiről tudjuk, hogy a módusban pontosan egy fényszecske, *foton* található.) Jól látható, hogy a függvény negatív értékeket vesz föl az origó körül, vagyis ilyen valószínűsűrűséggel leírható klasszikus állapot nem létezhet. A nemklasszikus kvantumállapotok előállítása fontos feladat a kvantumoptikában. Az elmúlt néhány évtizedben folyamatosan fejlődtek az ilyen irányú kísérletek, de a jól meghatározott fotonszámú, stabil és kontrollált fényforrás megalkotása ma is kihívást jelent. Egy

tetszőleges kvantumállapota jól közelíthető lenne [5].  
A kvantumoptikai kutatások másik fontos aspektusa az előállított nemklasszikus állapotok pontos mérése. A Wigner-függvény itt is fontos szerepet játszik, hiszen mint láttuk egyfajta vizuális névjegyet ad a kvantumállapotról. Láttuk azonban, hogy a kvantummechanika egyrészt alapvetően tartalmazza a véletlen jelenségét, másrészt bizonyos mennyiségek együttes, pontos mérését kizárja. Egy kvadratura különböző értékeinek valószínűségét azonban megmérhetjük, elvileg tetszőleges pontossággal, és így a Wigner-függvény alatti területeket kapjuk, a megfelelő koordinátatengelyre merőleges vékony csíkokban, vagyis egy vetületet. Az állapotot kissé elforgatva újabb vetületet mérhetünk ki. Az összes vetületből meghatározható maga a Wigner-függvény is. Az eljárás teljesen analóg az orvosi tomográfiával, ahol röntgen sugarak segítségével vesznek föl vetületeket a test egy síkjáról, különböző irányokból, ezért az

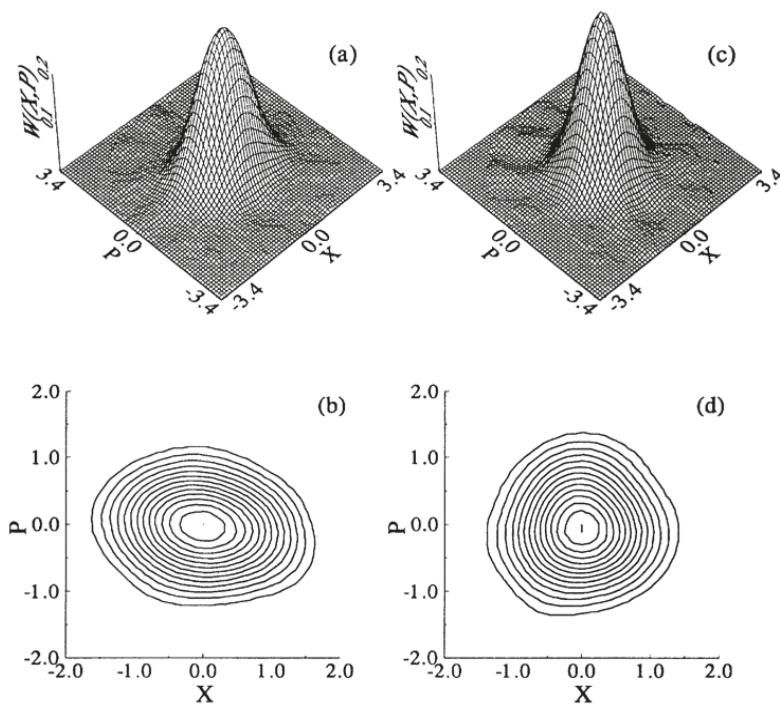


**3. ábra.** A Schrödinger-macska-állapot Wigner-függvénye

előbbi érdekes nemklasszikus állapot látható a **3. ábrán**. Két koherens állapot egyszerre van jelen, ún. szuperpozícióban,

előbbi eljárást kvantumtomográfiának is nevezik. Az optikai kvantumtomográfia a 1990-es évek elején vált kísérletileg






4. ábra. Kvantumoptikai mérésekből rekonstruált Wigner-függvények: a) és b): összenyomott vákuumállapot, c) és d): vákuumállapot [6]

is elérhetővé. A 4. ábrán a vákuum és egy másik érdekes állapot, az ún. összenyomott vákuum Wigner-függvényének optikai kísérletekből rekonstruált képét láthatjuk [6]. Ez utóbbi egy *torzított* haranggörbe: bár a kvadraturák várható értéke ekkor is nulla, az egyik kvadratura bizonytalansága csökkent, míg a másiké megnőtt, továbbra is kielégítve a Heisenberg-féle határozatlansági relációt. Az egyik mennyiség zaja tehát furcsamód még kisebb, mint vákuumban lenne! (Ennek az ára persze, hogy a másik mennyiség viszont valamivel zajosabb.) Az összenyomott állapotok kisé nemklasszikusak (Wigner-függvényük pozitív) és praktikusán optikai nemlineáris kristályokkal lézerefényből előállíthatók. Jelentős szerepet játszanak a kvantumoptikában és a nagy pontosságú mérés technikában. A kvantumtomográfia eredeti gondolata gyümölcsözőnek bizonyult más fizikai rendszerek állapotának megismerésében is. Különböző általánosításokkal lehetővé vált más szerkezetű kvantumrendszerek teljes állapotának feltérképezése is, amit gyakran szintén kvantumtomográfiának hívnak, bár az alkalmazott matematikai módszerek eltérőek lehetnek.

A kvantumoptika kísérleti technikáinak fejlődése a XX. század végére radikális változást eredményezett a kvantumme-

chanika jelentőségének értelmezésében. A kvantummechanika által leírható dolgok nem kézzelfoghatóak. Egy hétköznapi helyzetben csupa olyan dolgok vesznek minket körül, amelyek nagyon sok részecskéből állnak. Sokáig úgy gondolták, a kvantummechanika megfigyelhető következményeit végül mindig részecskék sokaságában kell keresni. Napjainkra azonban lehetővé vált akár egy-egy egyszerű kvantummechanikai rendszer: fényrészecske vagy atom közvetlen megfigyelése, manipulálása. Ezáltal bebizonyosodott: a kvantummechanika valóban az egyes részecskék viselkedését is helyesen leíró elmélet! Nem mellékesen ez a fejlődés alkalmazások: a kvantumtechnológiák, köztük a kvantum-kommunikáció, -titkosítás és a kvantumszámítógépek elveinek kidolgozásához is vezetett. Kvantumtitkosító eszközök már kaphatók is. Ezek olyan titkosított kommunikációt tesznek lehetővé, amelynek biztonságát lényegében a Heisenberg-féle határozatlansági reláció garantálja, vagyis lehallgatásukhoz azt kellene megsérteni. Megvalósítás szempontjából jóval nehezebb, még gyerekcipőben járó technológia a kvantumszámítógépeké, de a benne lévő ígért is hatalmas: olyan számítások elvégzését tennék lehetővé, melyek a szokásos digitális számítógépekkel lehetetlenek. Ilyen például a nagy számok prímfaktorizációja (mellyel

számos ma divatos titkosítás feltörhető lenne), vagy a különféle, gazdasági szempontból is lényeges nagyméretű optimalizálási feladatok. Fontos, részben még nyitott kérdés mindezzel kapcsolatban, hogy mi a számítások kvantumos gyorsulásának alapvető erőforrása, milyen kvantumállapotokkal és rajtuk milyen művetekkel érhető el az. Ezzel a kérdéssel kapcsolatban a Wigner-függvények használata érdekes eredményeket hozott. (Mivel a számítógépek állapotainak halmaza véges, a Wigner-függvények bevezetése ebben az esetben speciális matematikai megfontolásokat is igényel, amelyekre itt most nem térünk ki.) Logikusnak tűnik ugyanis, hogy ha a számítást végző eszköz állapota mindig pozitív Wigner-függvényekkel írható le, akkor a számítás klasszikusan is szimulálható, vagyis nem számíthatunk kvantumos gyorsulásra. És valóban: a közelmúltban többen (pl. Galvão, vagy V. Veitch és mtsai., stb.) rámutattak, hogy a számítások kvantumos gyorsulásához szükség van arra, hogy a résztvevő kvantumállapotok Wigner-függvénye egyes tartományokban negatív legyen [7]. Szilárd és Wigner ötlete tehát a XXI. század kvantumtechnológiáinak megértésében is fontos szerephez jut. 

## Irodalom

- [1] Wigner, Eugene. „On the quantum correction for thermodynamic equilibrium.” *Physical review* 40.5 (1932): 749.
- [2] Haroche, Serge. „Nobel Lecture: Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary.” *Reviews of Modern Physics* 85.3 (2013): 1083.
- [3] Wineland, David J. „Nobel Lecture: Superposition, entanglement, and raising Schrödinger’s cat.” *Reviews of Modern Physics* 85.3 (2013): 1103.
- [4] Schleich, W. P. (2011). *Quantum optics in phase space*. John Wiley & Sons.
- [5] Janszky, J., Domokos, P., Szabó, S., & Ádám, P. (1995). Quantum-state engineering via discrete coherent-state superpositions. *Physical Review A*, 51(5), 4191.
- [6] Smithey, D. T., Beck, M., Raymer, M. G., & Faridani, A. (1993). Measurement of the Wigner distribution and the density matrix of a light mode using optical homodyne tomography: Application to squeezed states and the vacuum. *Physical review letters*, 70(9), 1244.
- [7] Galvão, E. F. (2005). Discrete Wigner functions and quantum computational speedup. *Physical Review A*, 71(4), 042302.; Veitch, V., Ferrie, C., Gross, D., & Emerson, J. (2012). Negative quasi-probability as a resource for quantum computation. *New Journal of Physics*, 14(11), 113011.

HORVÁTH DEZSŐ

# A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit?

A részecskefizika elmélete, a Standard Modell szimmetriákon alapul, közülük azonban jó néhányat sért a gyenge kölcsönhatás. A Higgs-bozon felfedezése 2012-ben igazolta a részecsketömegek létrejöttének Brout–Englert–Higgs mechanizmusát spontán szimmetriasértéssel. Minden sikere ellenére, a Standard Modell elméleti nehézségekkel küszködik, amelyek további sérülő szimmetriákra utalnak. A cikkben áttekintjük ezeket a problémákat lehetséges elméleti megoldásukkal és a kísérletekkel, amelyek eddig egyiket sem támogatják.

A részecskefizika általánosan elfogadott elméletét, amelynek történetileg *Standard Modell* a neve, 45 éve építették, és azóta fejlesztik. Mértékszimmetriákon alapul, amelyek részben sérülnek. Wigner Jenő írta a mértékszimmetriákról: „A kvantumelméletben az invariancielvek még a klasszikus mechanikánál is messzebbre vezetnek... Ez a mértékszimmetria, természetesen, mesterséges képződmény, ahhoz hasonló, mint amikor az egyenleteinkbe egy kísérletet helyezünk helyzetmeghatározással. Az egyenletek megoldásának a kísérlet koordinátáitól függetlennek kell lennie, és emiatt nem világos, mire jók azok a koordináták.”

A sérült szimmetriák fontos részei a Standard Modellnek. *Frank Wilczek* írja: „Az elmélet központjában egy spontán sérülő mértékszimmetria áll. Ezen elv szerint a fizika alapegyenleteiben több szimmetria van, mint a való fizikai világban.” A Standard Modell több ilyen szimmetriát is tartalmaz: *Steven Weinberg véletlen szimmetriáknak* hívja őket. A legrégebben felismert sérülő szimmetria a részecskék világában a kiralitás vagy paritásértés, a kémiában Pasteur már egy évszázaddal korábban felfedezte. Azóta több sérülő szimmetria is előkerült, utoljára az elektromágneses és gyenge kölcsönhatást egyesítő, az elemi részecskék tömegét létrehozó *Brout–Englert–Higgs (BEH-)* mechanizmus spontán szimmetriasértését sikerült igazolni a Higgs-bozon felfedezésével. Vannak még feltételezett sérült szimmetriák is, a legismertebb közöttük a *szuperszimmetria*, amely az új részecskefizikai kutatások középpontjában áll.

A szimmetriák lehetővé teszik, hogy egyszerűen írjunk fel egyenleteket, meg

sérülés esetén is. Ennél azonban sokkal komolyabb a szerepük. *Emmy Noether* híres tétele értelmében a térelmélet minden folytonos szimmetriája fizikai mennyiségek megmaradásához vezet. Abból, hogy koordináta-rendszerünk kezdőpontját és szögét, valamint időmérésünk kezdetét tetszőlegesen felvehetjük (attól nem függhetnek a mérhető fizikai mennyiségek), következik a lendület, és a Dirac-egyenlet mértékinvarianciája, amely szerint a mérhető mennyiségek nem változnak meg, ha a rendszer állapotfüggvényét megszorozzuk egy  $e^{i\phi}$  imaginárius tényezővel, a fermionszám megmaradását vonja maga után.

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

**1. táblázat. A Standard Modell elemi fermionjainak három családja. A leptonokat és a kvarkokat a gyenge kölcsönhatás balra polarizált (L) párokba rendezi a  $T_3$  gyenge izospin kvantumszámával. Az antifermionok jobbra polarizált párokba rendeződnek. A kvarkállapotokat a gyenge kölcsönhatás keveri, azt jelzi az aposztróf**

Kölcsönhatás	relatív erősség	potenciál	élettartam (folyamat)	közv. bozon	$M$ (GeV)
Erős	1	$\propto r$	$10^{-23}$ s ( $\Delta \rightarrow p\pi$ )	8 gluon	0
Elektromágneses	$10^{-2}$	$\propto \frac{1}{r}$	$10^{-20} - 10^{-16}$ s ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )	foton	0
Gyenge	$10^{-7}$	$\propto \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{R}}$ $R \sim \frac{\hbar}{M_W c}$	$> 10^{-12}$ s ( $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$ )	$W^\pm$ $Z^0$	80 91

**2. táblázat. A Standard Modell alapvető kölcsönhatásai. A harmadik oszlopban a potenciál távolságfüggése látható, a negyedikben jellemző bomlási folyamat élettartammal, az utolsó kettőben a közvetítő bozon és tömege a nagyenergiás fizika szokásos energiaegységében ( $1 \text{ GeV} = 1,602 \times 10^{-10} \text{ J}$ )**

Az érdeklődő olvasó sok idevágó információt, talán emészthetőbb részletességgel megtalál az [1] ismeretterjesztő könyvben, illetve a [2] tankönyvben.



## A Standard Modell kölcsönhatásai

A Standard Modell szerint világunkat két-féle elemi (azaz pontszerű, belső szerkezet nélküli) részecske alkotja, a fermionok és a bozonok, amelyeket belső perdületük, spinjük különböztet meg egymástól. A redukált Planck-állandó,  $\hbar = 1,055 \times 10^{-34}$  Js egységében mérve a bozonok spinje egész,  $S = 0, 1, 2, \dots$ , a fermionoké pedig fél-egész,  $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ . Az elemi fermionokat három családba soroljuk, családonként egy-egy pár kvarkot és leptont tartalmaznak (**1. táblázat**). Valamennyi fermionnak létezik antirészecskéje azonos tulajdonságokkal, de ellenkező töltéssel. A leptonok szabadon is léteznek, de a kvarkok csak három-kvark közötti állapotaként (ezek a *barionok*, mint a neutron vagy a proton) vagy kvark+antikvark kötött állapotban fordulnak elő (*mezonok*). Három antikvark természetesen antibariont alkot, mint amilyen az antiproton. A kvarkokból összetett részecskéket, a barionokat és mezonokat együtt hadronoknak hívjuk, ezért kapta a CERN óriási, protonokat és nehéz ionokat ütköztető gyorsítóberendezése a *Nagy hadronütköztető* (LHC, Large Hadron Collider) nevet.

Az elemi fermionokat tekintjük az anyagot alkotó részecskéeknek, az elemi bozonok viszont a kölcsönhatásokat közvetítik (**2. táblázat**). A három alapvető kölcsönhatást lokális (azaz a tér-idő koordináta-rendszerben meghatározott módon változó) mértékinvariációkból származtatjuk. Az erős kölcsönhatás mértékinvariációja az SU(3) szimmetriacsoportnak felel meg: a speciális (egységnyi determinánsú), unitér ( $U^{-1} = U^\dagger$ ),  $3 \times 3$ -as mátrixokénak. Az SU(3) globális mértékinvariancia vezet az erős kölcsönhatás háromféle töltésének (ezt a színlátással való analógia miatt *színtöltésnek* hívjuk) megmaradásához, a lokális SU(3) pedig magához a hadronokat összetartó erős kölcsönhatáshoz. Mivel a kvarkok közötti erős kölcsönhatás a háromféle színtöltés cseréjét jelenti, közvetítéséhez 8 bozonra, a gluonokra van szükség, a  $3 \times 3$ -ból egy színkombináció (a három szín egyenletes, színtelen keveréke) ugyanígy kiesik.

Az elektromágneses kölcsönhatás leírásához természetesen adódik az U(1) (itt nem kell az S előtag, mert az  $1 \times 1$ -es mátrixok képzetes számok) a gyengééhez pedig az SU(2) szimmetria magától adódik, de önmagában egyik sem működik. Egyesíteni kellett a kettőt, alkalmazni rá a spontán szimmetriasértés BEH-mechanizmusát, majd újra szétválasztani elektromágneses U(1)-re, és a megmaradt rész lett a gyenge kölcsönhatás pontos leírása. Így sikerült létrehozni mind a fermionok, mind pedig a gyenge kölcsönhatást közvetítő

tő bozonok tömegét, az utóbbiak minden egyéb feltételezés nélkül kiszámíthatók lettek a kölcsönhatás erősségéből. A közvetítő bozonok virtuálisak, amikor a kölcsönhatásban álló fermionok között *közlekednek*: a nulla tömegű foton véges tömeggel kell, hogy rendelkezzen, amikor energiát és lendületet visz át, és a 80 GeV tömegű W bozon a saját tömegénél csaknem négy nagyságrenddel kisebb energiát közvetít a neutron béta-bomlásakor. Mindezt a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés teszi lehetővé elegendően kis távolságon és rövid ideig. Ugyanakkor ezek a bozonok a valóságban léteznek és kísérletileg tanulmányozhatók, bár a fotonon kívül csak a bomlásaik eredményében. A foton nem hordozza az elektromos töltést, de a gluon hordozza a saját töltését, ezért a gluonok egymással kölcsönhatásba léphetnek. A gyenge kölcsönhatás valamennyi fermionra hat, az elektromágneses a töltöttekre, az erős pedig a kvarkokra. Matematikai nehézségek elkerülése végett a **2. táblázat** bozonjain kívül még szükség van egy olyan bozonra, amelynek a tömegén kívül valamennyi jellemző tulajdonsága nulla (töltések, spin), ezt *skalár bozonnak* hívjuk, és a BEH-mechanizmus szolgáltatja a tömegképződés melléktermékeként: ez a Higgs-bozon.

## Paritássértés

Ha mindhárom térkoordinátánk előjelét megfordítjuk, azaz ellenkezőre igazítjuk a Descartes-koordináta-rendszer tengelyeit, az egyenértékű azzal, mintha csak az egyik tengelyt fordítanánk meg, tehát jobbkezesből (amikor az x-tengelyt az y-ba forgatva a jobb csavar z irányba mutat) balkezes rendszerbe térünk át. Ha páros egy függvény, akkor ilyenkor nem vált előjelet, a páratlan viszont igen. Az egyszerű fizikai rendszerek függvényei általában vagy párosak, vagy páratlanok, de bármelyik függvény szétbontható páros és páratlan függvény összegeként, például a sorfejtési tagok szétválogatásával (mint a Taylor-sor páros és páratlan kitevőjű tagjai). A P paritásoperátor megváltoztatja a négyes tér-idő-koordináta előjelét:

$$P\psi(r, t) = \psi(-r, t); \quad P^2 = 1,$$

és természetesen unitér. Gömbszimmetrikus potenciál nem tudja megváltoztatni az állapot paritásállapotát, tehát az elektromágneses kölcsönhatás biztosan megőrzi a paritást. A részecskékhöz saját paritás rendelhető, a fotoné például alapállapotban negatív, azaz a P operátor a függvényét előjelváltásra készíti.

A paritássértés felfedezése paradoxonnal kezdődött: megfigyeltek két teljesen azonos, de különböző belső paritású ré-

szecskét, az egyik ugyanis két fotonra bomlott, a másik pedig háromra. 1956-ban Lee és Yang arra jutottak, hogy ez talán egyazon részecske, csak a paritásszimmetria sérül gyenge kölcsönhatásban. Óriási meglepetésre, két kísérleti csoport ezt hamarosan meg is mutatta. Kiderült, hogy a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti a tükröszimmetriát: a béta-bomlás kizárólag balra polarizált (fizikus szlengben *balkezes*) részecskéket és jobbra polarizált antirészecskéket kelt. Allítólag *Wolfgang Pauli* így fakadt ki akkor: „Nem tudom elhinni, hogy Isten gyenge balkezes!” A jelenséget viszonylag könnyű volt beépíteni az elméletbe: formálisan vetíteni kellett a részecskék áramát balra, az antirészecskéket pedig jobbra polarizált formába. Ezt jelképezi az **1. táblázat** L (left, bal) indexe a fermionpárok jele mellett.

## CPT-invariancia és CP-sértés

A paritáson kívül még két másik tulajdonságot is tükrözhetünk az elemi részecskék állapotfüggvényében: ellenkezőjére fordíthatjuk az idő folyását (*T-tükrözés*, az angol *time*, idő után) és a résztvevő részecskéket antirészecskékké helyettesíthetjük (*C-tükrözés*, az angol *charge*, töltés alapján). A részecskefizika elméletének egyik legalapvetőbb tétele, hogy a mérhető fizikai mennyiségek nem változhatnak mindhárom tükrözés egyidejű végrehajtásakor. Ez a *CPT-szimmetria* rendkívül szigorúan érvényesül, kísérletileg igen pontosan igazolták, és igencsak súlyos elméleti nehézségekkel járna, ha sérülne. Elektron és antirészecskéje, a pozitron kölcsönhatása szétsugárzáshoz vezet, amely matematikailag pontosan leírható úgy, hogy beérkezik egy elektron, kisugároz két vagy három foton, majd térben és időben kihárít a képből, a pozitron ugyanis egyenértékű egy ellenkező irányban haladó elektronnal.

Wigner Jenő szerepe itt is úttörő volt. Megmutatta, hogy az ilyen tükrözési invariancia vagy unitér, vagy antiunitér, és az időtükrözés antiunitér, azaz egy komplex konjugálást (egyszerű esetben az imaginárius egység előjelváltását) von maga után. Ezt a legegyszerűbb a P- és T-tükrözés összehasonlításával megérteni. A P-tükrözés a helykoordinátát ellenkezőjére fordítja, tehát megváltoztatja a hely- és a lendületvektor előjelét, a vonatkozó Heisenberg-összefüggés a hely és lendület együttes meghatározására tehát rendben marad, mert a két (-1) szorzó közömbösíti egymást. Ugyanakkor a T-tükrözés csak az idő előjelét változtatja meg, az energiát nem, tehát elrontja az energia-idő összefüggést, amely az állapotfüggvényben

$e^{-iEt}$  fázisszorzóként jelenik meg, hiszen az energia nem lehet negatív. A problémát az időtükrözéssel együtt alkalmazott komplex konjugálás oldja meg, azzal az energia pozitív marad.

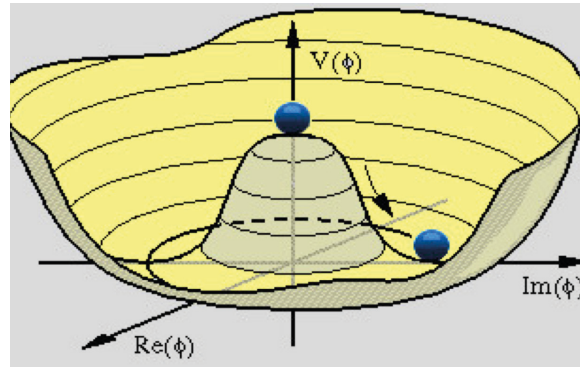
Az elemi részecskék világában az időtükrözési invariancia gyakorlatilag követelmény, azonos valószínűséggel várjuk a mikroreakciók lefolyását előre és hátra. A paritásértés felfedezése után a fizikusok ezt is megkérdőjelezték. Ha elfogadjuk a CPT-szimmetriát, akkor a T-szimmetriából a CP-invariancia következik. A kísérletek megmutatták, hogy a gyenge kölcsönhatás a CP-szimmetriát is sérti, de csak igen kevéssel, nem maximálisan, mint a paritásért.

Mára az időtükrözési szimmetria sértését is sikerült kísérletileg megmutatni. A kvarkok erős kölcsönhatásban keletkeznek, de gyenge kölcsönhatásban bomlanak, és a két kölcsönhatás sajátállapotai különbözőek, a gyenge tehát kevert állapotok érzékeli a kvarkok erős kölcsönhatásban létrejövő állapotait. A CP-szimmetria sértését Kobayashi és Maskawa építette be az elméletbe: a kvarkok gyenge keveredését leíró transzformációs mátrixban egyetlen fázisszorzó elég volt erre.

### A spontán szimmetriasértés BEH-mechanizmusa

Az üres tér, a vákuum (amely persze a valóságban soha nem üres) tökéletesen szimmetrikus, minden irányban azonos. A BEH-mechanizmus spontán sérti ezt a szimmetriát egy olyan potenciáeloszlás behelyezésével, amelynek minimuma nem a nullában található. Ezt kiválóan szemlélteti a sombrero (1. ábra), az ugyanis tökéletesen szimmetrikus a függőleges tengelye körül, amíg a csúcsponjtára helyezett golyó le nem gurul a völgybe. A rendszer tehát spontán megsérti saját szimmetriáját.

A spontán szimmetriasértést csaknem egyidejűleg többen is bevezették 1964-ben, elsőnek R. Brout, F. Englert és P. W. Higgs. Négykomponensű mezővel tölti ki a teret, amely így négy szabadsági fokot ad az elméletnek, három közülük tömeget teremt a gyenge kölcsönhatást közvetítő bozonoknak, a negyedikből pedig létrejön a Higgs-bozon. A BEH-mechanizmus lehetővé tette a gyenge bozonok tömegének kiszámítását, létrehozta az elméleti számítások számára fontos skalár bozont és lehetővé tette a fermionok tömegének bevezetését az elméletbe. Habár a Higgs-bozont csak 48 évvel a BEH-mechanizmus születése után sikerült felfedezni, a részecskefizikusok túlnyomó többsége biztos volt benne, hogy meg fogják találni. Azért nem min-



1. ábra. A BEH-mechanizmus szemléltetése. A potenciál hengersizimmetriáját nem rontja el a csúcsára helyezett golyó, annak szükségszerű legurulása viszont igen. A hengersizimmetria ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a koordináta-rendszer elforgatásával a golyó a  $\Phi$  komplex tér  $(v,0)$  minimumába kerüljön

denki: Stephen Hawking a felfedezés bejelentésekor közölte: „Úgy látszik, vesztettem 100 dollárt”.

A Standard Modell elektrogyenge kölcsönhatását leíró, igencsak bonyolult energiasűrűség rendkívül tömören felírható a következő formában, amely elterjedten látható pótlókon és kávésbögréken a CERN környékén:

$$-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \psi_i y_{ij} \psi_j \Phi + (D_\mu \Phi)^2 - V(\Phi)$$

Az első tag a mező (erőtér) saját energiája, a második a  $\psi$  állapotfüggvényű fermion kölcsönhatása a mezővel, ahol a  $\not{D}$  az erőtér eloszlását is tartalmazó kovariáns differenciálást jelöli. A harmadik tag generálja a fermion tömegét a  $\Phi$  BEH-térrel kölcsönhatásban, negyedik a gyenge bozonokét, az utolsó pedig a BEH-mező energiasűrűsége.

### A Higgs-bozon keresése és felfedezése

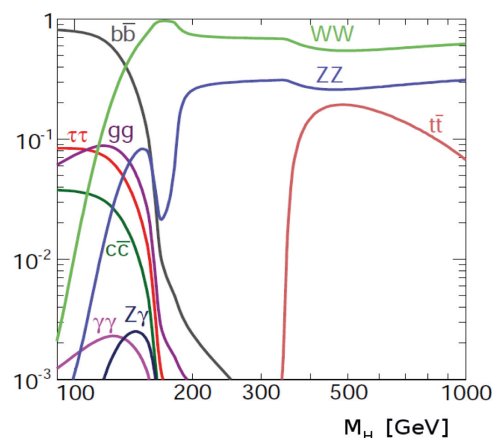
Ugyan Peter Higgs azt írta: „Igazából csak 1972-ben kezdődött az életem bozonként”, de a BEH-mechanizmust, minden sikere ellenére, addig nem fogadhatták teljesen el, amíg termékét, a Higgs-bozont meg nem figyelik. Négy évtizeden át építettek egyre nagyobb részecskegyorsítókat a megfigyelésére. A Standard Modell Higgs-bozonja az egyetlen létező skalár részecske: minden kvantumszáma nulla, a tömege az egyetlen mérhető tulajdonsága. A Standard Modell paramétereinek részle-

tes kísérleti tanulmányozása megmutatta, hogy a Higgs-bozon tömegének 100 GeV környékén kell lennie, attól ugyanis a többi paraméter is függ.

Ehhez az értékhez a CERN-ben a LEP elektron-positron ütköztető jutott a legközelebb. A statisztika gonosz volt a fizikusokkal: a négy LEP-kísérlet közül az egyik majdnem kimutatott egy 115 GeV tömegű Higgs-bozont, de a másik három ugyanott semmit nem észlelt. A megfigyelés komoly izgalmat váltott ki, nagyon sok fizikus kérte a CERN főigazgatójától a LEP működésének

meghosszabbítását, de az nem engedett, mert kellett az alagút az LHC-nak, amelynek már javában épültek a részegységei.

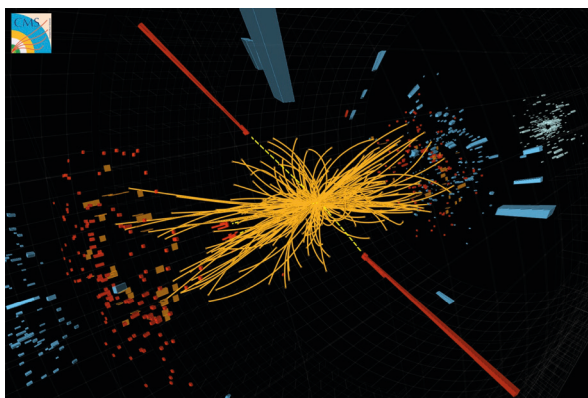
A LEP-hez hasonlóan, az LHC-nak is négy ütköztetési pontja van, de az elődjével ellentétben, a kísérletei meglehetősen különböznek. Kettő, az ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS) és a CMS (Compact Muon Solenoid) kezdetben kimondottan a Higgs-bozon felfedezésére összpontosított, az LHCb a világegyetem anyag-antianyag aszimmetriájára próbál fényt deríteni a b-kvark fizikája tanulmányozásával, a negyedik, az ALICE (A Large Ion Collider Experiment) pedig a világegyetem keletkezésekor feltételezett őanyagot próbálja rekonstruálni nagyenergiás nehézion-ütköztetéssel. Az ATLAS a világ legnagyobb



2. ábra. A Standard Modell Higgs-bozonjának lehetséges bomlási csatornái: a bomlási módusok relatív gyakorisága a Higgs-bozon tömegének függvényében. Vegyük észre, milyen kicsiny a legfontosabb felfedezési csatorna,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  kétfotonos bomlás részaránya



együttműködése és a CMS (amelynek a szerző is tagja) szorosan a nyomában van: a CMS-nek 2016 végén 5250 résztvevője volt (közötte 1916 MSc- és PhD-diák, valamint 1274 mérnök és technikus) 45 ország 198 intézményéből, a 40 magyar résztvevőt a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont és az Eötvös Loránd Tudományegyetem, valamint a debreceni Atommagkutató Intézet és a Debreceni Egyetem delegálja.



**3. ábra.** CMS-esemény két fotonnal, amelyek valószínűleg a Higgs-bozon bomlásánál keletkeztek. A protoncsomagok ütközésekor óriási a kibocsátott hadronok száma, amint azt a töltött részecskék mágneses mezőben görbült pályája mutatja. A fotonok nem hagynak nyomot (egyeses szaggatott vonal) és nagy energiájuk ellenére, amelyet a hosszú hasábok jelképeznek, teljes egészében elnyelődnek az elektromágneses észlelőrendszerben. A kék hasábok a hadronok észlelését mutatják a hadrondetektorban, a semlegesekhez ott sem tartozik pályanyom

A Higgs-bozon tömegét 100 GeV környékére vártuk. A LEP viszont már a 114 GeV alatti területet kizárta, fel kellett tehát készülnünk a legbonyolultabb, 120 GeV-es tömegtartomány vizsgálatára, ahol rengeteg egymással versengő reakció lehetséges (2. ábra). Már a korai szimulációk megmutatták, hogy a két legígéretesebb felfedezési csatorna a  $H \rightarrow \gamma\gamma$  és a  $H \rightarrow ZZ$ , amikor mindkét Z-bozon két-két töltött leptonra, elektron- vagy müonpárra bomlik. Mindkét reakció valószínűsége nagyságrendekkel kisebb, mint a hadronos bomlásoké, de azokat az LHC óriási hadronhárterétől nagyon nehéz elválasztani (3. ábra).

2012. július 4-én, a melbourne-i nagyenergiás óriáskonferencia kezdetén, az ATLAS és CMS kísérlet vezetői beszámoltak a CERN-ben (természetesen internetes kapcsolatban az ausztrál konferencia nagytermével és az egész világgal) a Higgs-bozon felfedezéséről. A két nevezetes bomlási csatornában a két kísérlet egyenként a becslült bizonytalanság öt-szörösével látott 125 GeV-es tömegnél a

Higgs-bozontól várt tulajdonságokkal egy új részecskét. A későbbi adatok természetesen messzemenően megerősítették a felfedezést. Az új bozon valamennyi tulajdonsága, keletkezési és bomlási valószínűségei a különböző folyamatokban megfelelnek a Standard Modell előrejelzéseinek. Ugyanakkor a megfigyelt 125 GeV-es tömeg kétségbe ejtette a részecskefizikusokat, mert túl könnyű és túl nehéz volt. Mint tudjuk, közvetlen köze van a vákuumhoz, viszont viszonylag kis tömege annak stabilitási hátterére helyezi: nem elképzelhetetlen, hogy többféle vákuumállapota is van és elvben át is csúszhat a világunk egy másikba. Ezzel Hawking is riogatta az emberiséget, holott az ősrobbanás után olyan óriási energiák tobzódtak, hogy ha van is másik vákuumállapota a BEH-térnek, a világunk biztosan a minumba került.

### A Standard Modell problémái

A Higgs-bozon felfedezésével a részecskefizika látszólag lezárta fejlődését, hiszen valamennyi nagyenergiás kísérleti adat megbízhatóan kiszámítható a Standard Modell segítségével. Ez utóbbi

azonban valamilyen értelemben kétségbeejtő, hiszen a modellnek jó néhány elméleti hiányossága van, amelyek közül néhányat felidézünk.

– Nem ad számot a gravitációról, amely rendkívül különbözik a részecskefizika három kölcsönhatásától.

– Nem képes leírni a kozmológiai megfigyeléseket, a sötét anyagot, a sötét energiát és az antianyag hiányát a világegyetemben.

– A BEH-mechanizmus nem származtatja, csak megengedi a kvarkok és a töltött leptonok tömegét, és az a megfigyelés, hogy a neutrínók is tömegesek, teljesen elmentmond neki.

– Nem tudja megmagyarázni a neutrínó-oszcillációt, ahhoz ugyanis szükség volna a gyengén kívül még egy kölcsönhatásra a neutrínók számára, de ilyen nem ismeretes.

– Rejtélyes, hogy lehet a protonnak pontosan feles a spinje, holott a tömege túlnyomó részét a benne gomolygó, 1-es spinű gluonok és virtuális kvark-antikvark párok adják.

– Honnan jön a bűvös hármas szám? A kvarkok harmados töltése, a három fermioncsalád (a kísérletek szerint nincs több) és az erős kölcsönhatás három színtöltése.

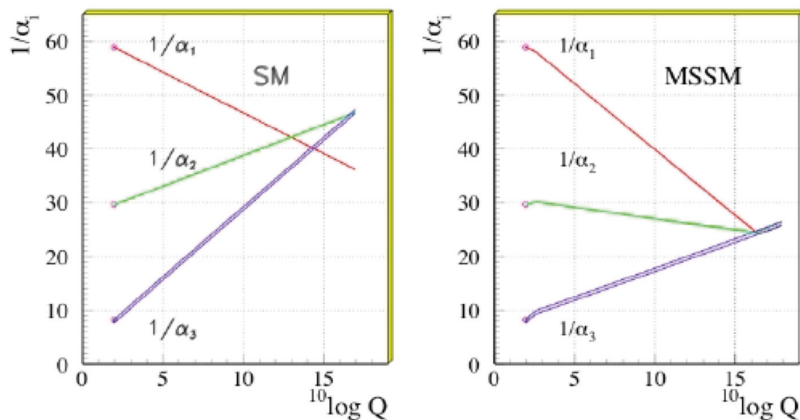
– A Standard Modellt a világunkat 19 szabad paraméter segítségével írja le. Ezek tömegek, a kölcsönhatások erősségére jellemző csatolási állandók és keveredési paraméterek. Ezt lehet soknak tekinteni, de hozzájön még hét, ha a neutrínóállapotok keveredését is beleszámoljuk.

– Talán a legsúlyosabb a *hierarchia-probléma*. A Higgs-bozon tömegének számításánál eszementen óriási járulékok jelennek meg (ún. *sugárzási korrekciók*), amelyekről valahogyan meg kell szabaddulni.

### Szuperszimmetria

Ezt a modellt, amely a leírt problémák egy részére jó megoldást kínál, a hierarchia-probléma sugallja. Azok a bizonyos óriási korrekciók kioltják egymást, ha a fermionok és a bozonok párokban léteznek azonos tulajdonságokkal, csak különböző spinnel. Mivel a gyenge kölcsönhatás különbséget tesz a balra és jobbra polarizált részecskék között, a Standard Modell minden fermionjához két bozont, és minden bozonjához egyetlen fermiont kell rendelnünk. Az utóbbit úgy érjük el, hogy azok a fermionok saját antirészecskéi (Majorana-részecskék) lesznek. Ez a SUSY-nak becézett szimmetria nyilvánvalóan sérül, hiszen ilyen részecskéket nem látunk, ha léteznek is, sokkal nagyobb a tömegük, mint a Standard Modell részecskéié. SUSY lehetővé teszi a gravitáció csatolását a mértékkölcsönhatásokhoz,  $S=2$  spinű közvetítő bozonnal, amelyet *gravitonnak* neveznek. Szimpatikus jelöltet kínál a sötét anyagra. Ha ugyanis megmarad a szuperszimmetria saját kvantumszáma, akkor a legkönnyebb SUSY-részecske stabil lesz, nincs hova bomlania. Ugyanakkor nem is csomósodhat, mert saját antirészecskéje lévén, szétsugároz, ha túl közel kerül egymáshoz.

A SUSY-modelleknek legalább két különböző, két komponensű BEH-mezőre van szükségük, hogy megalkothassák az alsó és felső típusú, balra és jobbra polarizált fermionok bozontársainak tömegét. Mivel ez 8 mezőt jelent, és hármat elhasználnunk a gyenge bozonok tömegére, a maradék szabadsági fok 5 Higgs-bozont hoz létre, három semlegest és két töltöttet. A legkönnyebb semleges Higgs-bozon tömegét a becslések 100 GeV alá várták, és annak hasonlóan kell lennie a Standard Modelléhez, ebben az értelemben találtak túl nagyok a mért tömeget. Az is család-



4. ábra. A három mértékkölcsönhatás csatolási állandója (erőssége) az energiacsere függvényében. Balra: A Standard Modell csatolási állandói ugyan összetartanak, de nem találkoznak. Jobbra: A Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell három csatolási állandója közös pontban találkozik  $10^{16}$  GeV körül: azt hívjuk a nagy egyesítés energiájának

dást okozott, hogy az LHC-ban elérhető energián nincs másik Higgs-bozon, hiszen annak felfedezése jelentősen növelte volna a SUSY hitelt. Ugyanakkor óriási pozitívum, hogy a *Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell* nagy energián egyesíti a kölcsönhatásokat (4. ábra), amire a Standard Modell viselkedése ugyan utal, de azt nem teljesíti.

Sajnos, a Standard Modell minimális kiterjesztése 105 új paramétert visz be a Standard Modell 19-e mellé, ami csaknem kezelhetlenné teszi a modellt. A nagy részecskegyorsítóknál évtizedek óta keressük nyomait. Született néhány rendkívül leegyszerűsített változata, amely feltételezte, hogy a nagy egyesítés energiája felett az összes részecske tömege azonos, de ezeket a kísérleti adatok nem támogatják. Mivel a sötét anyag jelöltje, a legkönnyebb SUSY-részecske nem észlelhető, keletkezése nagy hiányzó lendületet jelent az észlelt eseményben, például erősen féloldalas eseményt. A leptonos reakciók neutrínói hasonlóan jelentkeznek, tehát ez a technika is nagyon pontos számításokon alapuló szimulációkat igényel. A jelenlegi keresési stratégia az, hogy egyszerű, jól leírható, de nagy hiányzó energiával jelentkező eseménytípusok tanulmányozásával eltéréseket keressünk a Standard Modellel végzett szimulációktól.

A szuperszimmetria, ha egyáltalán igaz, mindenképpen sérül, hiszen ilyen részecskéket nem látunk a jelenlegi gyorsítókkal elérhető energiákon. A legkönnyebb SUSY-részecskét a két nagy LHC-kísérlet gyakorlatilag már 2 TeV (2000 GeV) energia alatt kizárta. Ennek ellenére máig ez a Standard Modell legszimpatikusabb kiterjesztése, hiszen nagy elődjéhez, a BEH-

mechanizmushoz hasonlóan, egy szimmetriasértés bevezetésével számos problémát megoldani látszik.

### Neutrínótömegek

A neutrínók repülés közbeni egymásba alakulása, a neutrínó-ízregzés (oszilláció) megfigyeléséből az következik, hogy a Standard Modell háromféle neutrínója között két tömegkülönbséget látunk, közülük tehát legalább kettőnek véges (bár nagyon kicsi) tömege van, és az nem életszerű, hogy az egyik éppen nulla tömegű legyen. A Standard Modell ezzel szemben kizárólag nulla tömegű neutrínókkal működik. Jogos a kérdés, mi az akadálya annak, hogy a többi elemi fermionhoz hasonlóan, a neutrínókra is beírjunk tömegtagokat az energiasűrűségbe? A nehézség az, hogy a tömeges neutrínóknak jobbra polarizált részecske- és balra polarizált antirészecskeárama is lesz, amelyek nem vehetnek részt a Standard Modellben a neutrínó számára egyedül rendelkezésre álló gyenge kölcsönhatásban. Ráadásul az egyetlen kölcsönhatás kizárja a neutrínó-ízregzéshez szükséges kétféle sajátállapotot is. A neutrínókat tehát az ízregzés és a véges tömeg többszörösen kivezeti a Standard Modell kereteiből, és azon a szuperszimmetria elmélete sem segít.

### Antianyag a világegyetemben

Az ősrobbanás után, a sugárzási időszakot követő lehűléskor részecskének és antirészecskének egyforma mennyi-

ségben kellett keletkeznie, a csillagászok viszont nem látnak antianyag-galaxisokat és a kozmikus sugarakban sem lehet kimutatni jelentősebb mennyiségben antibarionokat. Ezt az aszimmetriát nem magyarázza semmilyen kézzelfogható elv. Az egyik ezzel kapcsolatos elképzelés például az, hogy az ősrobbanás elején lezajló gyors felfűvődés eltávolított egymástól térrészeket, amelyek némelyike valamivel több részecskét, mások meg több antirészecskét tartalmaztak, és a fénysebességnél gyorsabb tágulás következtében ezek egymás eseményhorizontján kívül kerültek, tehát többé nem láthatók egymás számára.

Ha volna különbség részecske és antirészecske között, az magyarázná ezt az aszimmetriát, de a kísérletek azok egyenértékűségét bizonyítják igen nagy pontossággal. A CERN megépítette a kissé fellegzősen *Antianyaggyárnak* nevezett Antiproton-lassító berendezését, ahol jelenleg hat kísérlet vizsgálja a részecskék és antirészecskék egyenértékűségét kimondó CPT-szimmetria teljesülését, egyre növekvő pontossággal, amely jelenleg már elérte a  $10^{-9}$  relatív értéket.

### Összefoglalás

A részecskefizika elmélete, a Standard Modell tartalmaz jó néhány sérülő szimmetriát. A tértükrözési paritás-szimmetriát a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti, és az időtükrözést is, de sokkal kisebb mértékben. Az elemi részecskék, a fermionok és a bozonok tömege az elmélet szerint spontán szimmetriasértés következménye. Mindez ma már a Standard Modell szerves része megfelelő matematikai háttérrel és kísérleti bizonyítással.

Valamennyi sikere ellenére azonban a Standard Modell elméleti nehézségekkel, hiányosságokkal küszködik, amelyek megoldására további szimmetriasértő modelleket javasolnak, közöttük a sérülő szuperszimmetria a legnépszerűbb. Az kétségtelenül jó néhány problémát megoldana, de korántsem valamennyit, és semmiféle kísérleti bizonyíték nincs a létezésére. A kísérleti részecskefizikában komoly erőfeszítések történnek ezek tisztázására.

### Irodalom

- [1] Horváth Dezső: *A Higgs-bozon*, Typotex, 2017.
- [2] Horváth Dezső és Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részek fizikájába*, Typotex, 2017.



DOMOKOS PÉTER

# A kvantummechanikától a kvantumtechnológiáig

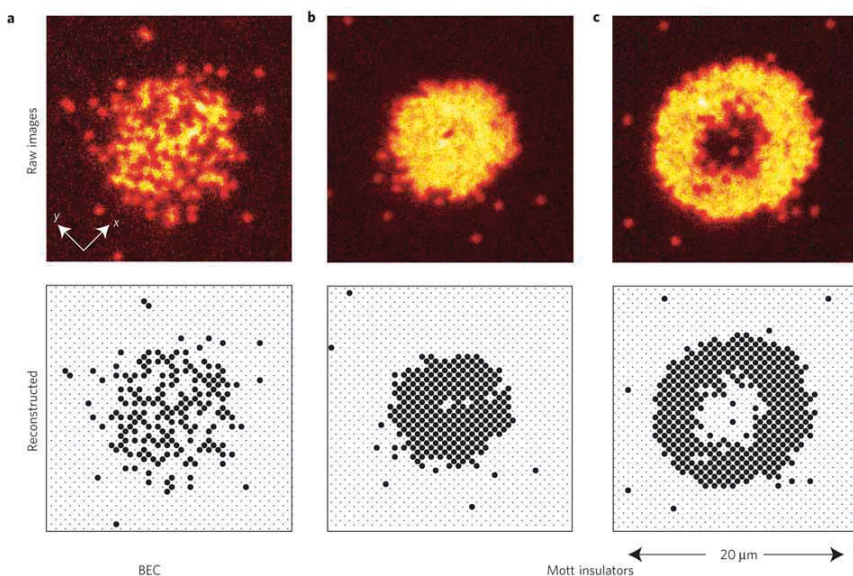
Wigner Jenő 1902-ben lényegében egyszerre született azokkal az első felismerésekkel, amelyek az 1920-as évek közepére, tehát Wigner diákorára, elvezettek egy forradalmian új elmülethez, a kvantummechanikához. Az elmélet kibontakoztatásában már Wigner Jenőnek is döntő érdemei voltak. A kvantumelmélet rendkívül sikeresnek bizonyult, hatása messze túlmutat a fizika keretein, és nyugodtan megállapíthatjuk, hogy jelentősége meghatározó a huszadik század kultúrtörténetében. Lenyűgöző, hogy sikerült feltárni és matematikai formulákba önteni az ember számára közvetlenül nem megtapasztható atomi méretskálán uralkodó törvényeket. Az eredetileg az atomok belső szerkezetét leíró elmélettel meg lehetett magyarázni a kémiai kötések molekulaiban, majd egyre összetettebb anyagok, folyadékok, kristályok szerkezetét. A mikroszkópikus elméleti leírás alapján értelmezhetőek a már kézben megfogható, makroszkópikus méretű testek fizikai tulajdonságai: például a szín, átlátszóság, rugalmasság, vagy az elektromos vezetőképesség (szigetelők, félvezetők, fémes vezetők). Az anyag mélyebb rétegei felé haladva, a szubatomi világban, szintén a kvantummechanika adja az elektronok, protonok, neutronok, müonok, sőt, a kvarkok fizikájának elméleti keretét. A teljes ismert anyagi világban jól működik a kvantummechanika. Érdemes megjegyezni, hogy maga Wigner Jenő is nagyon széles tartományban alkotott, jelentős hozzájárulása volt a szilárdtestfizikához és a nukleáris fizikához is.

A kvantummechanika elfogadása a kísérleti bizonyítékok miatt gyorsan bekövetkezett, ugyanakkor a makroszkópikus világból nézve furcsának tűnő törvényei miatt a megemésztés hosszú ideig, majdnem egy évszázadig tartott. Az egyik furcsaság a szuperpozíció elve, miszerint ha egy részecskének többféle állapota lehetséges, akkor ezek egyszerre, egymással “interferálva” is megjelenhetnek. Ha a kvantummechanikát a nagy tömegű testekre extrapoláljuk, nyilvánvaló lehetetlenségbe ütközünk: bár csábító lehetőségnek tűnik, hogy egyszerre két helyen legyünk, illetve hogy saját magunkkal interferálva haladjunk át egyszerre két nyitott ajtón, ezek nyilvánvaló képtelensé-

gek. De ne csalódjunk idejekorán, valamilyen módon a kvantumelméletnek ezeket az izgalmas következményeit mégiscsak átültethetjük majd gyakorlati alkalmazásokba.

A kvantummechanika másik lényegi furcsasága akkor mutatkozik meg, ha legalább két részecske állapotát vizsgáljuk egyszerre. A szuperpozíció miatt a két részecske úgynevezett “összefonódott” állapotba kerülhet.

matikai egyenlőtlenség formájába öntötte a paradoxont: felső határt adott a két részecskén végrehajtott mérési eredmények közötti korreláció klasszikusan lehetséges mértékére [2]. Egy úttörő, 1982-ben végrehajtott mérést követően [3], az 1990-es évek közepétől kezdve nagyon pontos mérésekkel sokszorosán igazolták, hogy a Bell-egyenlőtlenség sérül, azaz a térben eltávolított két részecske



**1. ábra. Optikai rács, a tökéletes kristály. Atomokat csapdázunk lézerekkel kialakított fénycsövekben, ahol az álló duzzadóhelyek tökéletesen szabályos geometriai rendet követnek. Az atomok kölcsönhatnak a szomszédaikkal, illetve minden egyes atomon belül az elektronállapotoknak köszönhetően még egy gazdag dinamikai világ van, amelyet külső mágneses terekkel, illetve lézerekkel kontrollálhatunk (Forrás: Sherson, J. F. et al. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator. *Nature* 467, 68–72 (2010)).**

Ilyenkor egy részecske állapota nem értelmezhető a másiktól függetlenül, még akkor sem, ha az állapot létrehozását követően a két részecskét egymástól jó messzire eltávolítjuk. Összefonódott állapotban az egyik részecskén végzett méréssel a másik, akár távoli pontban lévő részecske állapotáról pillanatszerűen pontos információt nyerhetünk. Ez a lehetőség Einsteint nagyon zavarta, és egy 1935-ös cikkében Podolskyval és Rosennel paradoxonként tekintettek a kvantummechanikának erre a következményére [1]. Később John Bell ír fizikus mate-

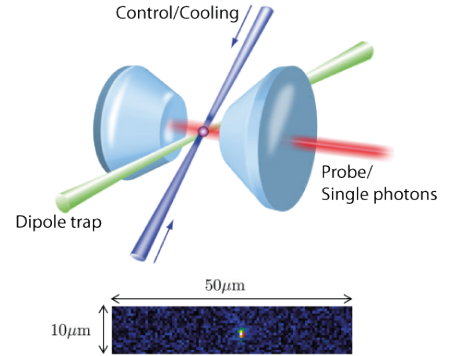
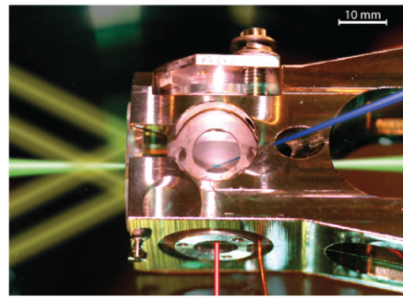
között valóban erős, “kvantumkorreláció” áll fent, amelyet semmilyen klasszikus valószínűségi folyamattal nem lehet értelmezni. Az összefonódott állapotok jelentik az egyik kulcsot a kvantummechanika jövőbeli, forradalmian újszerű alkalmazásaihoz.

Az anyagszerkezet atomi szintű megértésének következtében az új kvantumfizika már a kezdetektől fogva ontotta magából az alkalmazásokat, és lényegében egy ipari-technikai forradalmat idézett elő a huszadik században. Rögtönözzünk egy gyors felrolást! Gondoljunk először a maghasadás-

ra épülő nukleáris iparra, atomerőművekre, amelyek az energiaszükségletünk jelentős részét biztosítják. A mindennapi életünk része a lézer (pl. CD olvasókban, lézeres mutató és távmérő eszközökben, és számtalan orvosi műszerben), ami egy kvantumjelenség, a populáció inverzió alapul. Korábban a hagyományos elektronika áramköri eszközeiből építettek jelerősítőket (klisztron), pl. a radarokhoz. A centiméteres hullámhossztartomány alatti mérettartományban viszont már nem a megszokott módon viselkednek az áramköri elemeink. Ekkor kapóra jött, hogy vannak természetadta, kisebb áramkörök: maguk az atomok és molekulák, amelyekben az elektron az atommagok vonzó potenciálvölgyében bezárva “kering”. A kvantumelméletből tudjuk, hogy az elektronnak diszkrét állapotai vannak, és előidézhető az az egyensúlytól távoli állapot, hogy a magasabb energiájú állapotban van több atom. Ez a populáció inverzió jelensége, ami újfajta erősítési mechanizmusként szolgált először mikrohullámú jelek (MASER), majd látható fényjelek erősítésére (lézer). Szintén az atomok diszkrét elektronszerkezetének kihasználásán alapszik az időmérés céziumatommal definiált standardja. Az atomórával elért pontosság áldásait élvezzük a mindennapokban, pl. a Föld körül keringő műholdak atomórához szinkronizált GPS jele révén. A szilárdtestfizika vívmányai a szennyezett félvezető kristályok, amelyekből a tranzisztort állították össze. A tranzisztoros áramkörök miniatürizálva, elektronlitográfiával, ionimplantációval, valamint egyéb modern módszerekkel nyomtatott áramkörökhöz, processzorokhoz, végső soron a modern számítógéphez vezettek. A számítógépben létrehozott rengeteg digitális adat tárolása mágneses úton történik. A mágnesség atomi szintű megértése a kvantumelméletnek olyan koncepcióját használja, az ún. spint, amelynek nem is létezik megfelelője a klasszikus fizikában. Végül említsük meg azt, hogy a spinek mágneses rezonanciájára az orvosi képalkotásban is hatalmas szerepet vívott ki magának (MRI). Ezek példák az atommagfizikától az atomfizikán át a szilárdtestfizikáig, amelyek jól illusztrálják, hogy a minket körülvevő anyagok természetének pontosabb megértése új alkalmazásokat szült. Ezeket az eszközöket széles körben használjuk a mindennapjainkban. Ezzel együtt a lézerek, számítógépek és egyéb laboratóriumi eszközök létrehozták azt a háttér is, amelyre új technológia, a kvantumtechnológia épül.

## A második kvantumforradalom

A kvantumrendszerek fizikájában robbanásszerű fejlődés ment végbe az 1990-es évek óta, amelyet szokás a “második kvantumforradalomnak” nevezni. A fejlődés lé-



**2. ábra. Atom-foton molekula. Tükrök között egyetlen fotonnak is nagy elektromos tere van, így egyetlen atommal kölcsönhatásba lépve egy molekulához hasonló kötött állapot jön létre. A képen látható az egyetlen csapdázott atom, lézerral megvilágítva (Forrás: <http://www.mpq.mpg.de/quantumdynamics>)**

nyege, hogy immár nem csupán megfigyelői vagyunk a kvantumos világ jelenségeinek, hanem aktívan beavatkozhatunk. Atomokra, molekulákra, fotonokra mi róhatunk ki a kvantummechanika törvényeinek engedelmessé mozgást. Az irányításhoz leginkább lézereket, illetve elektromos és mágneses mezőt használhatunk. A meglévő manipulációs technikák lehetővé teszik, hogy az egyedi kvantumos objektumokat az elérhető legalacsonyabb bizonytalanság mellett, a fundamentális kvantumzaj szintjén kontrolláljuk, tehát a környezetből ne szivároгjon a kvantumos finomságokat elmosó zaj az irányított rendszerbe. Ezek után az egyes elemekből, mint legókockákból építhetünk összetett “kvantumgépeket”. A kvantummechanika atyjai, köztük Wigner Jenő, az 1920-as, 30-as évektől kezdve ún. gondolatkísérletek nyelvén fejezték ki magukat a vitákban és diszkusziókban, hogy kifejezzék, milyen nehéz alkalmazni az új elméleti nyelvet a természet leírására. Nem is remélhették, hogy a “Végy egy atomot, bocsásd rá egy kettős resre, stb.” és egyéb hasonló jellegű megfogalmazások ténylegesen elvégzett kísérletek receptjei lesznek az 1990-es évekre. Ma azért van szükségünk fantáziára, rendhagyó ötletre, hogy feladatokat találjunk ki a célzottan megépíthető kvantumgépek számára.

A kvantumgépekhez az alkatrészek két-féle családja áll rendelkezésre, amelyeket persze kombinálni is lehet. Egyrészt a természetes objektumok; úgymint atomok, ionok, fotonok. Ezek kontrollálása azért borzasztóan nehéz, mert ki kell választanunk egyetlen atomot egy sokaságból: gondoljuk meg, hogy 1 liter térfogatban, szobahőmérsékleten, légköri nyomáson  $10^{22}$  db részecske van. Nagy vákuumban, trükkös lézeres technikákkal lehet elszigetelni és megcímkézni egyetlen atomot. Egyszerre lehet többet is: lézerekkel kialakított fény állóhullám duzzadóhelyein, egy tökéletesen szabályos kristályszerke-

zetben csapdázhatunk atomokat, minden duzzadóhelyen pontosan egyet (1. ábra), ezt optikai rácsnak nevezik. Ehhez az atomi gázt példáulanul alacsony hőmérsékletre, nanokelvines tartományra szükséges hűteni. Az atomok duzzadóhely körüli hőmozgása elhanyagolható, a hőmérsékletük a nanokelvin tartományba esik (az abszolút zérusponthoz felett a hőmérséklet 8 tizedesjegyre nulla). Az optikai rácsban minden atomot külön-külön meg lehet címezni, és az atom vegyértékelektronját tetszőleges módon pakolgatni bizonyos elektronpályák között. Töltéssel rendelkező ionok esetében a csapdázást lézerek helyett elektródákkal is meg lehet valósítani.

Hogyan lehet egy fotont csapdázni? Ehhez két tükrre van szükség, amelyeknek a felülete extrém gondossággal van megmunkálva, nagyon sima és egy nagyon erősen tükröző réteggel van bevonva. A két tükröt egymással szembefordítva egy rezonátor alakul ki (2. ábra), amelyben a fotonok egymilliószor pattognak a két tükrök között, és ennyivel megsokszorozzák az “erejükét”. Ha a rezonátorban lézerral csapdázunk egyetlen atomot, az atom és a rezonátorba zárt foton között erős elektromágneses sugárzási kölcsönhatás létesül, így egy foton és egy atom ugyanúgy kötött állapotot hoz létre, mint amit a molekulánál szoktunk meg. Például a vízmolekulában két hidrogén- és egy oxigénatom alkot molekulát, teljesen megváltoztatva az anyag tulajdonságait (a hidrogén és az oxigén gáz, a víz pedig folyadék halmazállapotú normál körülmények között). Hasonlóképpen az atom-foton molekula is teljesen új anyag, azonban ez a természetben nem létezik, hanem a kvantummechanikai manipulációs technikáinkkal állítjuk elő.

Az alkatrészek másik családja a mesterséges atomok. Például kristályokban mindig vannak a szabályosságot megtörő pont hibák, amik számunkra hasznosak is lehetnek. Ilyen pl. a gyémántbeli NV cent-



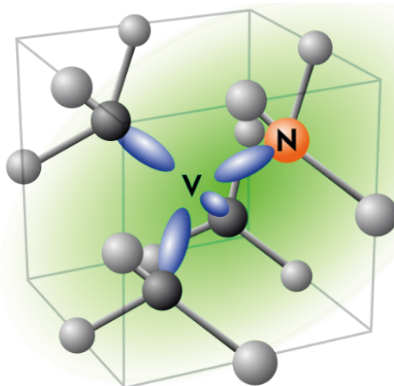
rum, ahol a gyémántrács egyik szénatomját nitrogén helyettesíti, a szomszéd rácshely pedig üres, azaz ún. vakancia. Az NV centrum befoghat egy elektront, ami ilyenkor (mintha egy atom vegyértékelektronja lenne) elektronpályákon helyezkedhet el. Az atomszerű képződményben az elektron lézerekkel és mágneses terekkel gerjeszthető. Egy kisméretű gyémánt kristályban mesterségesen létrehozott egyetlen NV centrum beazonosítható, megcímezhető, és ezáltal lényegében egy hordozható atomot kapunk.

Vannak olyan mesterséges atomok, ahol semmit nem bízunk a természet spontaneitására. Kihhasználva a nanotechnológia eszközparkját, miniaturizált szilárdtest struktúrákban (“top-down” megközelítés) izolálhatunk kontrollálható kvantum rendszereket. A kontroll megszerzéséhez a környezeti hatásokat kell kiküszöbölni, ezért a mesterséges atomokon folyó kísérletekhez a rendszert tipikusan nagyon alacsony hőmérsékletű kriosztátban kell elhelyezni. Különböző félvezető anyagokból rétegeket növesztve, és a rétegeket kétdimenzióban struktúrálva az elektronok számára egy “doboz” készíthetünk (3. ábra). A “dobozban” ugyanúgy állóhullámú kötött pályákra vannak bezárva az elektronok, mint az atommagok vonzó Coulomb-potenciáljában. Továbbá, akár csak a normál atomokban, a kötött pályák között az elektron fényvel gerjeszthető, illetve legerjesztődésekor egy fotont bocsát ki. Ezek a kvantumpöttyök, amelyek tökéletességének a gyártási folyamat pontatlanságai szabnak korlátot. A félvezető heterostrukturákra elektromos kontaktusokat lehet illeszteni, amelyekkel az elektromos potenciálviszonyokat, és ezen keresztül a kvantumpöttyben lévő elektron állapotokat szabályozhatjuk. A gyártási technológia egyszerűen kiterjeszhető, egymás mellett két vagy több kvantumpöttyt alakíthatunk ki. Az atomokat egy általunk meghatározott konfigurációban helyezhetjük el.

Végül a mesterséges atomok harmadik jelentős családja a szupravezető anyagokon és az ún. Josephson-átmeneten alapszik. Ez utóbbi egy vékony szigetelő réteg, ami két szupravezetőt választ el egymástól. Ebben a rendszerben nem egyes elektronok dinamikáját kell szabályoznunk, hanem kollektív elektrongerjesztéseket. Ezeknek is diszkrét állapotai alakulnak ki a szigetelő rétegen történő kvantum alagutazás miatt. Igaz, a szomszédos állapotok közötti gerjesztés energiája nem a látható fény, hanem a mikrohullámú sugárzás hullámhossztartományába esik. Ehhez a sugárzásához tartozó hullámvezetőket, rezonátorokat a szokásos elektronikai elemekhez hasonlóan lehet készíteni. Az

egyedüli extra követelmény, hogy a kvantum viselkedéshez nagyon alacsony, millikelvin hőmérsékletre kell hűteni az áramköröket. Az egész rendszer, az atomokat helyettesítő Josephson-átmeneteket tartalmazó áramköri elemek, illetve a fényt helyettesítő rezgőkörök és mikrohullámú rezonátorok, tetszőleges elrendezésben, egyetlen nyomtatott áramkörre vannak integrálva (4. ábra). Ez a tervezhetőség ennek a szupravezető kvantumrendszernek hatalmas alkalmazási potenciált ad.

Akár természetes, akár mesterséges atomokat tekintünk, ma már ezekből az elemekből építhetők olyan összetett rendszerek, amelyek pontos leírása a jelenlegi számítógépes kapacitás határait feszegeti [4]. Például lineáris ioncsapdában 30 iont tárolhatunk, mindegyiket külön-külön megcímezhetjük lézerekkel. Az ionok két



**3. ábra. Kristályhiba, a hordozható atom. Kisméretű gyémántrácsban lévő speciális hibahely, amikor egy szénatom helyére nitrogén ül be, a szomszédos szénatom pedig hiányzik. A képen látható zöld folt egy ilyen nitrogén-vakancia (NV) centrumban lokalizált elektronfelhő, amelynek energiaszerkezete egy atoméra hasonlít, és az atomokhoz hasonlóan lehet kontrollált műveleteket végezni rajta. A nanoméretű kristálynak köszönhetően ezt a mesterséges atomot könnyen tudjuk mozgatni, és a megfelelő helyre juttatni**

(Forrás: <http://montanainstruments.com/low-temperature-physics-research/Applications/>)

kiválasztott elektronállapotát tekinthetjük úgy, mint egy logikai bit 0 és 1 állapotának megvalósítását. Megfelelő lézerműveléssel tetszőleges forgatást hajthatunk végre a két állapot terében, tehát a logikai 0 és 1 szuperpozíciós állapota is megvalósul. Ezért ezt kvantumbitnek nevezik, és az így megnyíló lehetőségeket tárgyalja a kvantuminformáció elmélete. A 30 kvantumbit tartalmazó ioncsapdában  $2^{30}$  különböző kvantumállapot állítható elő, és ezek tetszőleges szuperpozíciója is. Ennek nyomkövetése már feszegeti egy mai számítógép lehetőségeinek határát, ugyanakkor ha 45 ion lenne a láncban, akkor az állapotter már bele sem férne a legnagyobb

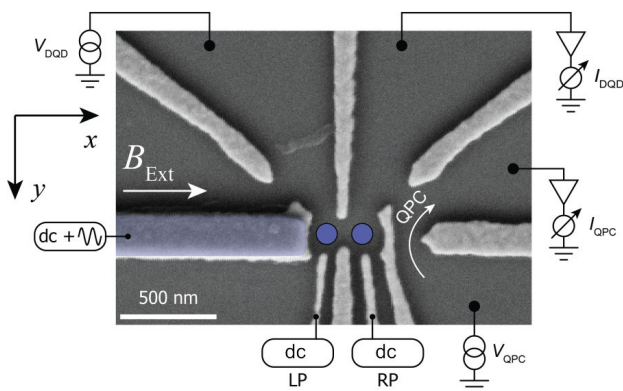
mai szuperszámítógép memóriájába. Más szempontból nézve ez a rendszer önmagában egy kis számítógép, egy “kvantum-abakusz”. A kérdés az, hogy mire lehet használni?

## Kvantumtechnológia

Mire lehet használni egy kisméretű kvantum számítógépet? Ez a kérdés vezet el a kvantumfizika tudományának új stádiumába, amelyet kvantumtechnológiának nevezünk. Vannak jól kontrollált, letesztelt kvantum elemek, amelyekből építkezve különböző feladatokhoz kereshetünk megoldásokat. Az Európai Unió elindított egy új “zászlóshajó” programot, amelynek célja, hogy a tudományos műhelyekből kivigye a piacra és az ipari szereplőkhöz a kvantumtechnológia lehetőségeit [1]. A struktúrált programban az alkalmazásokat négy körben keresik: ezek a kvantum szimuláció, a kvantumkommunikáció, a kvantum érzékelés, és a kvantumszámítás.

A tudományos világ érdeklődésétől legkevésbé eltávolodó alkalmazási irány a kvantumszimuláció. Mint korábban említettük, a kvantumbitek egy elegendően nagy hálózatainak leírása, pl. ilyen a kísérletekben használt 30 ionból álló lánc, már nehéz feladat egy klasszikus számítógép számára. Ez azt az ötletet adja, hogy éppen ilyen kvantumrendszert használhatnánk egy még nagyobb, még bonyolultabb kvantum rendszer tanulmányozására. Ezt az ötletet egyébként Feynmann még akkor vetette fel [5], amikor a kvantumtechnológia

ma már működő elemei még csírájukban sem léteztek. Az ionlánchoz hasonló a lézerek állóhullámú terében csapdázott semleges atomok rendszere, amelyben az atomok egy, kettő vagy akár három dimenzióban tökéletesen szabályos rácsszerkezetet alkotnak. A szomszédos atomok között a kölcsönhatás erőssége külső terekkel szabályozható (mágneses térben az úgynevezett Feshbach-rezonancia jelenségét használják ki a kutatók), akár vonzó, akár taszító kölcsönhatást is beállíthatunk. Jól látható, hogy így egy célzottan felépített “processzorhoz” jutunk, amely a fizika törvényeit követve, egyszerűen a normális időfejlődése során “kiszámolja” azokat a szilárdtestfizikai modelle-



**4. ábra.** Kvantumpötty, a dobozba zárt elektron. Mesterséges atomot a nanotechnológia eszköztárának köszönhetően tervezett módon gyártani is lehet, mégpedig úgy, hogy az elektronokat bezárjuk egy különböző félvezetőkből struktúrált szerkezetbe, amelyben az elektromos potenciál elektródákkal állthatjuk be. A kép síkjában van a GaAs félvezető réteg, amelyben a réteg feletti elektródákkal alakítjuk ki a kvantumpöttyöket (kék pontok)  
(Forrás: <http://www.nano.physik.uni-muenchen.de/nanophysics/research/rep10.html>)

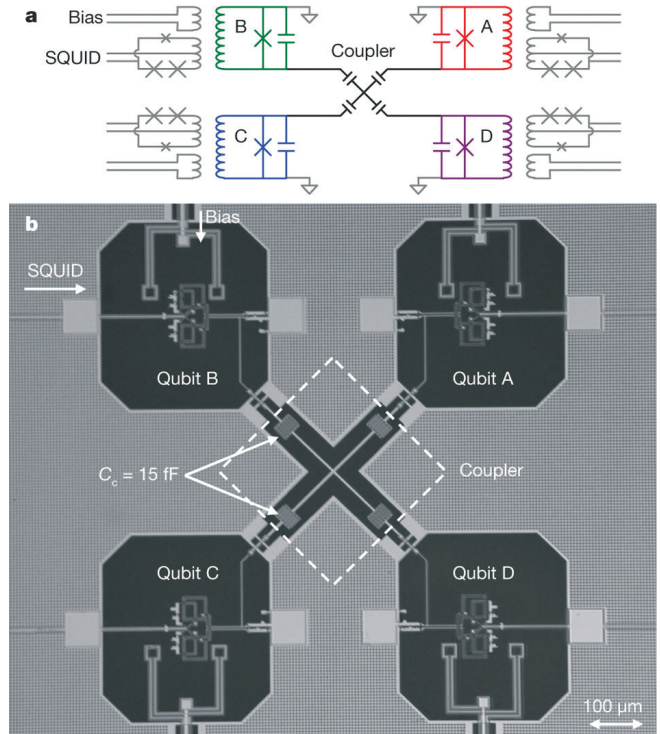
ket, amelyekkel a szilárd anyagok tulajdonságait értelmezzük évtizedek óta. Az egyik nagy cél, hogy az 1980-as évek közepén megfigyelt magas hőmérsékletű szupravezetés okát megértsük egy kvantumszimulátor segítségével. Ennél általánosabban nézve, a gyors számolások révén lehetővé válik gyógyhatású molekulák gyorsabb beazonosítása, vagy pl. hatékonyabb műtrágya gyártása kvantumszimulátor segítségével.

A kvantumtechnológia jelenleg legelőrehaladottabb területe a kvantumkommunikáció. A távközléshez a legalkalmasabb objektum a foton, amely fénysebességgel szállíthatja az információt, és a környezetrel gyengén hat kölcsön. A fotonok állapotába könnyen lehet kvantumbit információt kódolni, például a polarizációjukba, ami lehet vízszintes vagy függőleges, a logikai 0 és 1 értékeknek megfelelően. A kvantuminformaticai protokollok akkor működnek megbízhatóan, ha a fényimpulzus pontosan egyetlen fotonot tartalmaz. Ehhez egyfotonos fényforrásokra van szükség. Például a nanokristályokban lévő szincénterumok lézeres gerjesztésével nyerhetünk egyfotonos pulzusokat. Földközben, szabad légkörben egyetlen foton tervezett továbbítására a rekord 140 km, a Kanári szigetsorozat két szigete között [6]. Csillagászati megfigyelésekre használt távcsöveket fordítottak egymással szembe, az egyik állomásról küldtek, a másikon fogadtak egyetlen foton, és dekódolták annak a kvantumbit tartalmát. Ez a távolság bőven meghaladja azt, ami ahhoz szükséges, hogy a légkörön keresztül egy mű-

holdra juttassunk el egyfotonos impulzusokat. Ezt a célt is sikerült elérni: 2016 augusztusában Kína fellőtt egy műholdat, amelyen osztrák és kínai kutatók együttműködésében készült összefonódott fotonpárforrást helyeztek el. A műhold két, egymástól 1200 km távolságban, a ritka légkörű Tibetben elhelyezkedő földi állomás között tudott kvantuminformációt megosztani [7]. De mire jó a kvantuminformáció?

A kvantuminformáció hasznát egy már ténylegesen működő alkalmazással, a titkosítással - azaz kvantumkriptográfiával - illusztrálhatjuk. A kvantumkriptográfia stratégiai fontosságú a kommunikációban, mert tökéletes titkosítást ad, amelyet semmilyen klasszikus számítógéppel nem lehet feltörni, sőt, ha kísérlet történik a lehallgatásra, a kommunikációban részt vevő partnerek ezt egyszerűen detektálhatják. Kereskedelmi forgalomban lehet kapni olyan kriptográfiai eszközt, amely 100 km-es távolságon tud ilyen kvantumosan titkosított kulcsot megosztani [8]. Az ezt gyártó céget svájci fizikusok indították el, akik eredetileg alapvető fizikai kérdések kutatásával – a Bell egyenlőtlenség sértésének minél meggyőzőbb kimutatásával – foglalkoztak.

A másodpercenként 300 ezer km-t megtevé fotonok a kvantuminformációt kitűnően továbbítják, viszont annak tá-



**5. ábra.** Nyomatott kvantumáramkörök, a jövő számítógépe. Alacsony hőmérsékletű tartályba helyezett, szupravezető elemeket tartalmazó áramkörök kvantummechanikai viselkedést mutatnak. A kvantumbiteknek bonyolult hálózata nyomtatható rá egy lapkára, amely képes lehet egyes speciális matematikai feladatokat gyorsan megoldani.  
(Forrás: Neeley M., et al, Generation of three-qubit entangled states using superconducting phase qubits Nature 467, 570–573 (2010))

rolására nem alkalmasak, éppen állandó terjedésük miatt. A foton által hordozott információt valahogyan át kell írni egy "kvantummemóriába". Itt jönnek a képbe a cikk elején bemutatott atom-foton molekulák: a szabadon terjedő foton képes egy rezonátorban tárolt atom-foton molekula fotonjává változni, majd az atom képes átvenni a teljes információt. Az atomi elektronállapotokba beírt kvantuminformációt ezután az atomok hosszú ideig megőrzik. A folyamatot megfordítva is le lehet játszani, ilymódon pedig kiolvashatjuk a memóriából a kvantumállapotot [9].

A kvantumtechnológia másik, már a piacon lévő termékekkel jelentkező fejlesztési iránya a kvantumos érzékelés. Nagyon sokféle eszköz tartozik ide, ugyanis pl. a mágneses, elektromos, gravitációs terek mérésében az érzékenységet növeli az interferencia, ami a kvantummechanika egyik fő sajátossága. A gravitációt mérő graviméterek az anyag hullámtermését használják ki. Alapvető fontosságú az időmérés, amelynek pontossága minden egyéb mennyiség mérésébe továbbgyűrűzik. Az atomok lézeres manipulá-



cíójának köszönhetően a cézium-atomóra esetében jelenleg  $10^{-15}$  az időmérés relatív pontossága [10]. Ez kisebb bizonytalanságot jelent, mint 1 másodperc az univerzum teljes élettartama alatt. A pontosság növelésére már megvannak a kollektív atomi gerjesztéseken alapuló módszerek, amelyekkel a  $10^{-18}$  relatív pontosság is elérhető. Ilyen pontos órával választ kaphatunk a fizika egyes alapvető kérdésére, mint például az univerzális állandók időbeli állandósága. Emellett olyan praktikus következménye is van, hogy néhány centiméteres felbontással mérhetjük az általános relativitáselmélet szerinti gravitációs potenciált.

Végül térjünk rá a negyedik alkalmazási területre, az 1990-es évek óta emlegetett kvantumszámítógépre. Ez a mai elképzeléseink szerint nem egy általános célú, a mi világunkban megszokott személyi számítógéphez hasonló konstrukció lesz. Ehelyett reális esély látszik célzott kvantum hardverek elkészítésére, amelyek egyes matematikai problémákat tudnak megoldani. Ebben az irányban mozdult el a D-Wave és az IBM kvantumszámítógépe is [11], amelyek optimalizációs feladatok megoldására vannak megépítve. Ezekben az években vagyunk a remélhető áttörés küszöbén, hogy a prototí-

pusok demonstrálják egy klasszikus számítógéppel már nem megoldható probléma megoldása révén a kvantumszámítás hatékonyságát. A versenyfutás a területen aktív kutatókat is élénken foglalkoztatja, és heves viták kísérik az eredmények értelmezését. Abban közmegegyezés van, hogy a közeljövőben a fent említett példákat követve, széles palettán jelennek meg új, már a kvantumtechnológián alapuló eszközök és alkalmazások, amelyek a mindennapi életünk részévé válnak. Wigner és társainak forradalmi elmélete mintegy 100 év lefolyása alatt technológiává érett.  $\blacktriangleright$

### Irodalom

- [1] Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935); [https://en.wikipedia.org/wiki/EPR\\_paradox](https://en.wikipedia.org/wiki/EPR_paradox)
- [2] Bell, John. On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox, *Physics* 1 3, 195–200, Nov. 1964
- [3] Alain Aspect; Philippe Grangier; Gérard Roger (1982). „Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities“. *Phys. Rev. Lett.* 49 (2): 91
- [4] <https://www.scienceathome.org/games/quantum-moves/science-behind/>
- [5] Magyarország szintén elindított egy Nemzeti Kvantumtechnológia Alprogramot a Nemzeti Kiválósági Program keretében.
- [6] Feynman, Richard (1982). „Simulating Physics with Computers“. *International Journal of Theoretical Physics.* 21 (6–7): 467–488.
- [7] X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin & A. Zeilinger, *Quantum teleportation over 143kilometers using active feed-forward*, *Nature* 489, 269–273 (2012)
- [8] Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers, Juan Yin et al, *Science* Vol. 356 pp. 1140–1144 (2017); ismertetőt ld. [http://index.hu/tech/2017/06/19/oriasi\\_tudomanyos\\_rekordot\\_ert\\_el\\_kina\\_kvantumuholdja/](http://index.hu/tech/2017/06/19/oriasi_tudomanyos_rekordot_ert_el_kina_kvantumuholdja/)
- [9] Kereskedelmi forgalomban kapható kvantumkommunikációs eszközöket ld. pl. <http://www.idquantique.com>
- [10] Max-Planck Institute for Quantum Optics, Prof. G. Rempe, <http://www.mpg.mpg.de/4996520/details>
- [11] <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/primary-standard-nist-fl>
- [12] ld. IBM sajtóközlemény; <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/52403.wss>

CSEH JÓZSEF

# Wigner és a csoportvész a magfizikában

## 80 éves a szupermultiplétt-elmélet

Wigner Jenő az 1963. évi Nobel-díjat az atommagok és elemi részecskék elméletéhez való hozzájárulásáért kapta, főként az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért. A Nobel-előadásában [1] a szimmetriák szerepét úgy fogalmazta meg, hogy azok oly módon kormányozzák a természettörvényeket, ahogyan az utóbbiak az eseményeket. Vagyis a legátfogóbb kerettörvények szerepét töltik be. Ezt a meglátását azóta nagyon sokszor idézik, méltán.

Időközben a részecske- és magfizika kicsit terebélyesedett és kicsit jobban szétvált egymástól. Am a szimmet-

riák szerepe mit sem veszített jelentőségéből, éppen ellenkezőleg: úgy tűnik, ma gyakrabban emlegetik őket mindkét diszciplinában, mint korábban bármikor. Számos elméletnek a gerincét alkotják, rendszerező erejük pedig mindkét tudományág csontvázát adja.

Ebben az írásban elsősorban egy olyan szimmetriát veszünk szemügyre, melyet Wigner 1937-ben vezetett be, az SU(4)-et, vagy más néven szupermultiplétt-elméletet. Ez a szimmetria az elmúlt 80 év alatt sok jó szolgálatot tett a magfizikában és nem elhanyagolható következményekkel járt a részecskefizikában is. Tekinté-

lyes kora ellenére azonban ma sem vonult nyugdíjba, hanem közvetlenül, vagy közvetve utat mutat az új modellek és elméletek fejlesztéséhez.

### Szimmetriák

1931-ben jelent meg Wigner alapvető könyve a csoportelmélet kvantummechanikai alkalmazásáról [2]. Ez a könyv generációk számára szolgált alapvető tankönyvként. Sokan innentől számítják a „csoportvész” kitorrését. Német nyelven írta, akkoriban Németországban dolgo-

zott, de a könyv lényegében Magyarországon készült, amikor hazajött vakációra. Később természetesen több nyelvre lefordították.

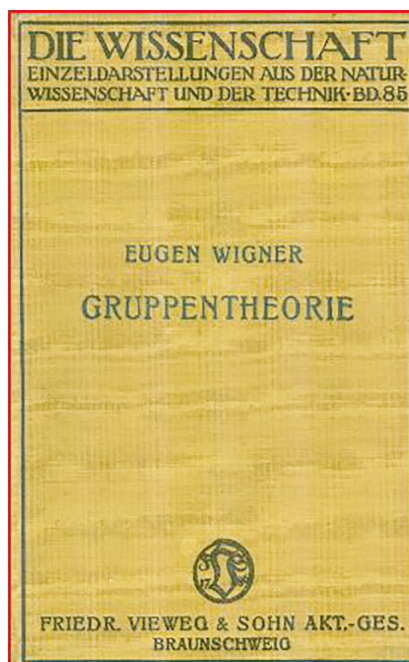
A csoportvész azoknak a fizikusoknak a megjelölése a csoportelmélet fizikai szerepére vonatkozóan, akik kevésbé szeretik a matematikának ezt az ágát. Egyesek még azt is hirdették, hogy minden elmélet meg lehetne fogalmazni nélküle is. Ma már ismerjük a történelem ítéletét: még ha lehetne is, nem érdemes. A csoportelmélet a szimmetriák matematikai nyelve, és ha elkerülnénk a használatát, az csak önkínzó elbonyolítást jelentené valaminek, aminek létezik szép és elegáns megfogalmazása.

Miért éppen csoportok? A csoport egy egyszerű matematikai struktúra, ami egyetlen műveletet tartalmaz, amit rendszerint szorzásnak nevezünk, de ennek nincs jelentősége. Jelentősége annak van, hogy erre a műveletre nézve a struktúra zárt, vagyis a művelet nem vezet ki belőle. Ilyen a szimmetria is. A szimmetria azt jelenti, hogy valamilyen transzformációt végrehajtottunk a vizsgált objektumon, és az eredmény azt nem változtatja meg, azonos marad az eredetivel. Ha egy gömböt elforgatunk, az ugyanúgy gömb marad. És ha az egyik transzformáció önmagába vitte át (ezt hívjuk szimmetriatranszformációnak), és van neki egy másik szimmetriatranszformációja is, ami önmagába viszi át, akkor a kettőt egymás után végrehajtva ismét csak az eredeti objektumot kapjuk. Vagyis: a transzformációk egymás utáni végrehajtására, mint műveletre nézve, zárt a struktúránk. A csoport a legegyszerűbb ilyen matematikai struktúra, ezért adja a szimmetriák nyelvét a csoportelmélet.

Egy csoportnak több ábrázolása is létezhet. A természetes számok felcserélése, egy szabályos háromszög forgatásai, vagy mátrixok szorzása három különböző dolog. De, ha az elemek közötti kapcsolat, amit a művelet teremt meg ugyanazt a szerkezetet mutatja, akkor matematikai szempontból azonosnak tekintjük őket. Azt mondjuk, hogy egy csoport három ábrázolásával van dolgunk. Legáltalánosabban a csoportábrázolást úgy szokás megfogalmazni, hogy az valamely vektortéren ható műveletekben ölt testet. A fizikában – érthető módon – a csoportok ábrázolása lényeges szerepet játszik, hiszen konkrét objektumokat konkrét módon kell leírni.

Miért volt az idegenkedés, a csúfondáros csoportvész elnevezés? Mert valami új jelent meg. A fizika nyelve a matematika, és Newton óta az uralkodó nyelvjárás a differenciálegyenletek volt. Ehhez képest a csoportok ábrázoláselmélete valami szokatlan, új dolog, érthető a húzódozás.

De hát a kvantummechanika is új és nem kevésbé idegen! Egyik megteremtője, Niels Bohr mondta: ha nem találod elképzelhetőnek, semmit nem fogtál fel belőle. Milyen is pontosan a kvantummechanika matematikai apparátusa? A fizikai állapotot egy vektortér egy elemével írjuk le, a fizikai mennyiségek pedig ezen a téren ható operátorok, vagyis műveletek. Ez szó szerint ugyanaz, mint amit a csoportábrázolásokról mondtunk! Elfogulatlan szemmel nézve tehát a csoportábrázolások éppen annyira természetes szövetségei az új fizikának, mint a differenciálegyenletek voltak a newtoni mechanikának. Csak hát



a nyilvánvaló dolgok felismerése is időbe telik, az ember pedig hajlamos elutasítani a szokatlant.

Egy másik mérföldkö Wigner életművében, és egyúttal a szimmetria szerepének felismerésében, éppen a csoportábrázolás, jelesen a Lorentz-csoport, ábrázolásának kérdésével foglalkozik [3]. A Lorentz-csoport azokat a transzformációkat tartalmazza, amelyeket a relativitáselmélet alapvetőnek tekint. Vagyis a relativitáselmélettel összhangban lévő elméletnek ez a csoport szimmetriacsoportja.

Ennek a dolgozatnak érdekes a története. Amikor elkészült és a szerző elküldte egy szakfolyóiratnak, a szerkesztők úgy döntöttek, hogy nem közlik. Nyilván nem találták helyénvalónak. Végül mégis napvilágot látott egy másik folyóiratban; melynek Neumann János, Wigner gyerekkori barátja, akkor már a szerkesztője volt. És amikor évtizedekkel később a

szerzőnek odaítélték a Nobel-díjat, akkor abban a döntésben ennek a cikknek jelentős szerepe jutott. Azt persze nem lehet tudni, hogy pontosan mekkora, de tartja magát az a vélekedés, hogy ezé volt a legnagyobb. Ez a cikk fogalmazza meg a matematika nyelvén azt, amit közérthetően a Nobel-előadásában mondott Wigner: a szimmetriaelvek a természettörvények kerettörvényei. A Lorentz-csoport segítségével osztályozta a kvantumelmélet alapegyenleteit (a Klein-Gordon-, Dirac-, Weil-, és Maxwell-egyenleteket), és keretet szabott annak, hogy új alapegyenletek milyen formájúak lehetnek. Később a cikk megjelenését ünneplendő indult el a nemzetközi Wigner-szimpozium sorozata, ami máig folytatódik. Egyike a kevés konferenciasorozatnak, amit egy szerző életművének szenteltek. Ez egy olyan cikk volt tehát, amit először nem akartak kiadni a 30-as években, azután döntő szerepe volt a Nobel-díj odaítélésében a 60-as években, végül egy máig folyó nemzetközi konferenciasorozat kelt életre szellemi örökségének ápolására. Érdekes tanulság a tudomány és emberi aspektusainak viszonyáról. (Ha egy szakfolyóirat visszautasít egy kéziratot, az még bizvást lehet Nobel-díjas, de a visszautasítás önmagában persze még nem garancia arra, hogy tényleg ilyen kvalitású.)

Tudománytörténeti érdekesség, hogy Wigner munkásságának magyar fordítója Györgyi Géza egy olyan csoport fizikai alkalmazásával ért el kiemelkedő eredményt, ami a Lorentz-csoport ikertestvére. (Mindkettő a négydimenziós tér [ortogonális] forgatásait tartalmazza.) Györgyi a Kepler-probléma rejtett szimmetriáját tárta föl [4]. Eredményét annak megszületésekor (a későbbi Wigner-díjas) Yuval Ne'eman, aki szintén jelen volt a Triesti Nemzetközi Fizikai Központban, tankegyetbe valónak ítélte [5].

#### SU(4), szupermultiplettek

Kevéssel azután, hogy kiderült: az atommag protonokból és neutronokból áll, vagyis a neutronok felfedezése után, Heisenberg azt javasolta, hogy tekintsük a protont és a neutront egyetlen részecske, a nukleon, két állapotának [6]. Megmutatta, hogy akkor a tulajdonságaik leírására haszonnal alkalmazható az az SU(2) formalizmus, amit a spin leírására már használtak. A spin a részecskének saját-impulzusmomentuma, melynek nagysága, és vetülete valamely tengelyre, a kvantummechanika szerint csak diszkrét értékeket vehet fel, vagyis nem változhat folytonosan (szemben a klasszikus mechanikában megszokottakkal).



A protonnak, a neutronnak, az elektronnak (és még sok más részecskének) a spinje  $s = 1/2$ , alkalmas mértékegységekben mérve. A lehetséges vetületek száma  $2s+1=2$ . Ezt jelenti az  $SU(2)$ -ben a szám: kétállapotú rendszerrel van dolgunk. (Az  $SU$  jelentését pedig a fizikai tartalma felől a legegyszerűbb megvilágítani: a részecskeszám megmaradására utal.) Heisenberg nyomán azt mondjuk, hogy a nukleonnak van egy  $t=1/2$  izospinje, ami fölfelé vagy lefelé állhat. Az  $SU(2)$  valójában egy csoportot jelöl, azoknak a forgatásoknak a csoportját, amelyek egy absztrakt térben, a spin- vagy izospintérben forgatnak.

Egy kvantummechanikai rendszer viselkedését a Hamilton-operátora (az energia operátora) kormányozza. Ezért azt nevezzük a rendszer szimmetriatranszformációjának, ami ezt az operátort önmagába viszi át. Heisenberg javaslata tehát más szavakkal kifejezve úgy hangzik, hogy az atommag Hamilton-operátora szimmetrikus az izospintér  $SU(2)$  elforgatásaival szemben. Hasonlóképpen feltételezzük, hogy szimmetrikus a spintérbeli  $SU(2)$  elforgatásokkal szemben is. Amikor részletesen megvizsgálták ezeknek a feltételezett szimmetriáknak a következményeit, és összevetették a kísérletileg megfigyelt tényekkel, akkor az derült ki, hogy ezek a szimmetriák pontosan nem, de közelítőleg érvényesek.

1937-ben Wigner egyesítette ezt a két szimmetriát [7], és kidolgozott egy olyan elméletet, amelyben a mag Hamilton-operátora változatlan marad annak a négydimenziós absztrakt térnek a forgatásaival szemben, aminek irányait a spin és izospin négy lehetséges beállása adja: (fel, fel), (fel, le), (le, fel), (le, le). Ennek szimmetriacsoportja az  $SU^4(4)$ , melynek részecscsoportjai (műveletet megőrző rész-halmazai) a korábban megismert kétdimenziós csoportok:  $SU^4(4) > SU^2(2) \times SU^2(2)$ . Elméletét szupermultiplett-elméletnek is nevezik, mert egyesíti a spin- és izospin multipletteket. A multiplett az állapotok egy családját jelenti, melyeket az azonos szimmetria rendel egymáshoz.

Az  $SU(4)$  szimmetria természetesen nem érvényes egzaktnál a természetben, hiszen az alkotó  $SU(2)$  részszimmetriái is csak közelítőleg érvényesek. Dinamikailag sérült szimmetriának nevezzük. (A név arra utal, hogy egy speciális szimmetriasértő kölcsönhatás felhasítja az állapotok energiáját, melyek egzaktnál szimmetria esetén azonosak volnának, de nem keveri az állapotokat.) A sérülés mértékét lehet mennyiségileg jellemezni, az különbözik aszerint, hogy könnyű, vagy nehéz magokról van-e szó.

Az  $SU(4)$  szimmetria ebben az évben volt 80 éves. Megítélése immár történelmi távlatból lehetséges. Azt mondhatjuk,

hogy fontossága kettős. Egyfelől az alkalmazása lényeges következményekre vezetett. Erre az alábbiakban említünk néhány példát röviden, egyet pedig kicsit részletesebben. Másrészt mintaként szolgált számos más, közelítő szimmetrián alapuló elmélet vagy modell megalkotásához. Ezekre is fogunk példákat látni.

Az  $SU(4)$  szimmetria megszabja, hogy az atommagok béta-bomlása mely állapotokat köthet össze [8] (az un. Gamow-Teller átmenet, melyben a kibocsátott részecskék elvisznek egy spin egységet is, csak egy szupermultiplett tagjai között lehetséges). Megmagyarázza a kötési energia kiemelkedő értékét azokban a magokban, melyekben a proton és neutronszám egyenlő és páros (ez az un. Wigner-energia) [9]. Megjósolja a proton és neutron mágneses momentumának arányát:  $-3/2$  (a kísérleti érték  $-1,46$ ) [10].

Amikor a szupermultiplett-elmélet 33 éves volt, akkor az addigi életútját szakértők úgy jellemezték, hogy a fizikus közösség lassan fogadta be. Ennek az volt a legfőbb oka, hogy túl korán született meg, amikor ismeretünk a magerőről és a béta-bomlásról még nem volt eléggé részletes. „Wigner profetikus módon előre megjósolta azokat” [11].

### Dinamikailag sérült szimmetriák, magmodellek

Wigner  $SU(4)$  szimmetriája nem csupán a szupermultiplettek leírása miatt volt fontos a magfizika fejlődésében, hanem azért is, mert módszertani útmutatással szolgált más jelenségek szimmetriákra alapozott leírása számára. Itt most két példát említünk szemléltetésül. Az egyik a térbeli, a valódi, háromdimenziós térbeli szabadsági fokok leírása a héjmodellben az  $SU(3)$  szimmetria révén, a másik a kéttestprobléma spektrumának generálása az  $SU(4)$  algebra által.

Mielőtt a héjmodellről szólunk, ide kívánczok egy bevezető megjegyzés az atommagok szerkezetmodelljeiről általában. A magot rendszerint sok nukleon építi fel. Vagyis a mag szerkezet-probléma egy kvantummechanikai soktest-probléma. Ahhoz túl sok, hogy egzaktnál meg tudjuk oldani az egyenleteit (hiszen már a négytest-problémába is beletörök a bicskánk, hát még a 14-nukleonéba, vagy a 114-testébe). Ahhoz viszont túl kevés az alkotóelemek száma, hogy a statisztikus módszerek önmagukban elegendőek legyenek a kezelésére. (A szilárdtest-fizika is soktest-problémával küzd, de az elektronok száma egy olyan mintában, amit az anyagtudományi laboratóriumokban vizsgálnak az Avogadro-számmal jellemezhető, vagyis kb. 22–23 nagyságrend-

del nagyobb a magban lévő nukleonok számánál.) Emiatt a mag szerkezet elméleti leírásában kulcsszerepet játszanak a modellek. A modellépítés során a problémát annyira redukáljuk, hogy az már megoldhatóvá váljon, miközben megpróbáljuk a fontos jellemvonásait nem meghamisítani. Bonyolult kihívás. (Ezért vélik úgy egyesek, hogy a modellalkotás a tudományé mellett a művészet vonásait is hordozza.) Az sem meglepő, hogy nem létezik egyetlen olyan modell, ami a mag szerkezet minden lényeges vonásáról számot ad, hanem csak többféle modell együttese képes azt megtenni. Ráadásul az alapvető szerkezetmodellek különböző fizikai képen alapulnak.

Talán a legsikeresebb a héjmodell, ami parányi naprendszernek, vagy miniatűr atomnak tekinti a magot, melyben néhány nukleon egy vonzó erőterében kering. De a magban nincsen nap, vagy nincs neki nagyon nehéz magja, mint az atomnak, akkor hát mi hozza létre a vonzó erőt? Az összes többi nukleon hatása. Valójában a héjmodell úgy írja le a magot, hogy annak sok nukleonja egy olyan zárt törzset alkot, aminek egyetlen szerepe az átlagos vonzó erőter kialakítása. Ebben mozognak a törzsen kívül rekedt un. valencianukleonok (természetesen egymással is kölcsönhatva). Vagyis a nukleonok nagy részét gyakorlatilag kivonjuk a forgalomból, ők csak az átlagter kialakításához járulnak hozzá, és a mag viselkedéséért a kis számú valencianukleont tesszük felelőssé. Ha arra gondolunk, hogy a magerők rövid hatótávolságúak és nagyon intenzívek (mondjuk az elektromos erőkhöz képest), akkor meglepő, hogy egy ilyen modell, ami egy szelíd átlagteren alapul sikeres lehet. Mégis az (annyira, hogy a megalkotóinak Nobel-díjat hozott). Számos érdekes magtulajdonság érthető e modell alapján, de nem mindegyik. A kép csak akkor lesz teljes, ha egészen más háttér szerkezetmodelleket is tekintetbe veszünk. A (szintén Nobel-díjas) kollektív, vagy cseppmodell például úgy tekint a magra, mint egy parányi folyadékcseppre, ami képes rezegni és forogni. A fűrtmodell (vagy klasztermodell) pedig, ami mind közül a legrégebbi, azt tételezi fel, hogy egy magot kisebb (és erősen kötött) atommagok alkotnak, úgy, mint egy molekulát az atomok.

A héjmodellben tehát a nukleonoknak van térbeli és természetesen spin- és izospin szabadsági fokuk. Ez utóbbi kettő leírására alkalmazható Wigner  $SU(4)$  szimmetriája. A három térbeli szabadsági fok jellemzésére pedig alkalmas az  $SU(3)$  szimmetria, amint ezt Elliott 1958-ban megmutatta [12]. (Majdnem egy évtizeddel korábban rámutatva e szimmetria fontos szerepére a magfizikában, mint

ahogyan az megkezdte fényes karrierjét a részecskefizikában a hadronspektrumok osztályozása révén). A 3-as dimenziószám részben érthető abból, hogy háromdimenziós térben zajlik a mozgás, de természetesen még további részletek is fontosak. Nevezetesen: az átlagter – mint kiderült – jól közelíthető egy oszcillátorpotenciállal (a klasszikus fizikából ismert rugóerőnek megfelelő potenciállal), és az SU(3) szimmetria az oszcillátorkvantumok térbeli eloszlását jellemzi. A héjmodell (közelítő) szimmetriája tehát  $SU^s(4) \times SU(3)$ , melynek első része Wigner szimmetriája, a második pedig egy annak mintájára született hasonló jellegű szimmetria a térbeli mozgás leírására.

Az SU(4) csoport, amit Wigner bevezetett a szupermultiplettek leírására egy egészen más szerepben is fontossá vált később. Kiderült, hogy a kéttest-problémának megalkotható egy olyan sikeres modellje, aminek SU(4) csoportszerkezete van. Itt azonban az SU(4) nem szimmetriacsoportot jelöl, mint a szupermultiplett-elméletben, vagy az SU(3) a héjmodellben, hanem egy dinamikai csoportot [13]. A különbség a következő. A szimmetriacsoport az azonos tulajdonságú állapotokat rendezi egy családba (multiplettbe). Például azonos az energiájuk egzakt szimmetria esetén, és közel azonos (vagy egyszerű szabályt követően különböző) a sérült szimmetria esetén. Ez jellemzi a szupermultiplett tagjait, vagy az SU(3)-multipletteket a héjmodellben. A dinamikai csoport egy nagyobb csoport. Tartalmazza a probléma (egzakt, vagy közelítő) szimmetriacsoportját is, tehát elvégzi azt a feladatot, amit a szimmetriacsoport, de tartalmaz egy spektrumgeneráló részt is. Tekintsük például a háromdimenziós oszcillátort! Annak, mint láttuk, az SU(3) szimmetriacsoportja, vagyis, az egy adott oszcillátorkvantumszámhoz tartozó állapotok osztályozhatók az SU(3) szerint. Az SU(4) dinamikai csoport ebből úgy áll elő, hogy hozzáveszünk még egy dimenziót, ami azonban nem térbeli dimenzió, hanem a különböző energiaszintek között léptet, vagyis generálja a spektrumot. Egyetlen SU(4)-multiplett ily módon sok-sok különböző energiájú állapotot foglal magában, egyúttal számot adva azok térbeli SU(3) szimmetriájáról is.

A magfizikában az SU(4) dinamikai csoport a fűrtmodellben jut fontos szerephez. Mondjuk, a  $^{20}\text{Ne}$  magot úgy képzeljük, hogy azt egy  $^{16}\text{O}$  és egy  $^4\text{He}$  alkotja. Ez utóbbiak különösen stabil, gömbölyű és erősen kötött magok. Egy ilyen molekulaszerű konfiguráció leírásában egy-

felől számot kell adnunk a két összetevő klaszter belső szerkezetéről. Ezt rendszerint a héjmodell alkalmazásával tesszük. Amint ez már szóba került annak  $SU^s(4) \times SU(3)$  szimmetriája van. Másfelől pedig le kell írunk a két alkotóelem relatív mozgását. Erre való az  $SU_f(4)$  modell, amit vibron modellnek hívnak [13]. Tehát egy kétklaszter-konfiguráció szimmetriáját az  $SU_{c_1}^s(4) \times SU_{c_1}(3) \times SU_{c_2}^s(4) \times SU_{c_2}(3) \times SU_f(4)$  csoport adja meg [14].

Kéttest-problémával természetesen másutt is találkozunk. Ennek megfelelően a vibron modellt alkalmazzák például a molekulafizikában kétatomos molekulák rezgési és forgási spektrumának leírására (innen a neve). Ez a leg-egyszerűbb felhasználása, amikor belső szabadsági fokokra nem kell figyelniük [15]. Számot ad továbbá a kétkvark-rendszer állapotairól (a mezonospektrumról), ahol a térbelin kívül a spin és iz szabadsági fokok is szerepet játszanak. A leg-összetettebb alkalmazása pedig a magfizikai fűrtmodellé, ahol a klaszterek belső szabadsági fokai még gazdagabbak.

### Kvartettek

A héjmodell a törzs- és valencianukleonok szétválasztásával erősen redukálja a leírandó szabadsági fokok számát. Az esetek többségében mégis nagyon nagy a számítási feladat, ezért számos további modell született az egyszerűsítés érdekében. Azoknak a magoknak a leírására, melyeknek páros a proton- és neutronszáma (röviden páros-páros magok) sikerrel alkalmazható a kölcsönhatóbozonmodell, amelynek az alapvető építőkövei nem nukleonok, hanem nukleonpárok. Ezeket a héjmodell valencianukleonjai alkotják, speciális módon párokba rendezve [16]. A 70-es években ez a modell a csoportelméleti leírás újabb nagysikerű hullámát hozta.

Hasonló alapeszméből sarjadtak ki a kvartettmodellek. Ezekben négy nukleon (két proton és két neutron) együttesen az alapvető építőkö. Értelemeszerűen az olyan páros-páros magok írhatók le vele, melyekben azonos a protonok és a neutronok száma. A kvartettmodelleknek régi és szerteágazó története van, melynek eredete Wigner szupermultiplett-elméletéhez nyúlik vissza. A nukleonok között ható erő vonzó, és rövid hatótávolságú, vagyis akkor tudja leginkább kifejteni hatását, ha a nukleonok nagyon közel van-

nak egymáshoz. Legkedvezőbb az, ha ugyanabban a (térbeli) állapotban vannak. Egy állapotban a Pauli-elv szerint, ami a természet alaptörvénye, azonos nukleonból csak egy foglalhat helyet. De a proton és neutron nem azonos, továbbá, mint az már szóba került, mindegyiknek kétféle spinállapota is van. Vagyis két proton és két neutron lehet ugyanazon a térbeli pályán. Ők négyen alkotnak egy kvartettet, melynek nukleonjai nagyon erősen vonzzák egymást, míg a kvartettek közötti kölcsönhatás gyengébb.

A kvartettmodellt sokáig szinte kizárólag a magok alapállapotú tulajdonságainak leírására használták, leginkább a kötési energia értelmezésére. A 70-es években azonban felmerült az a gondolat, hogy a négy nukleon együttesen átugorhat egy másik, nagyobb energiájú állapotba, ily módon előállhat a kvartettek gerjesztési spektruma [17].

Fontos általánosítása volt a kvartettfogalomnak a szimmetrián alapuló definíció: a kvartett két protonnak és két neutronnak olyan állapota, ami egy speciális spin-izospin szimmetriához tartozik, nevezetesen: Wigner-féle  $SU^s(4)$ -skalár [18]. Ez azért jelent nagy előrelépést, mert ilyen szimmetriája akkor is lehet a négy nukleonnak, ha azok különböző héjmodellpályákon vannak. Ennélfogva az általánosított kvartettek gerjesztési spektruma akárhány oszcillátorkvantumot tartalmazhat, míg az eredeti meghatározás szerint, melyben a négy nukleon ugyanazon térbeli állapotban van, és együttesen ugrik másíkba, sokkal kevesebb héjmodellállapot érhető el.

A kvartettek gerjesztési spektrumának tárgyalása a 70-es években kissé nehézkes empirikus modellek segítségével történt, miközben a héjmodellnek és a nukleonpárokat leíró bozonmodellnek elegáns és hatékony csoportelméleti megfogalmazásai léteztek. Arra csak a közelmúltban került sor [19], hogy a kvartettmodellt algebrai formalizmussal felruhazzák. Kiderült, hogy a héjmodell SU(3) formalizmusa, melyet Elliott már 1958-ban kifejlesztett, sikerrel importálható a kvartettek kezelésére is. (Szinte érthetetlennek tűnik, hogy erre miért nem került sor már sokkal korábban.) Ha az egyszerűbb kvartettfogalmat vesszük alapul, mely szerint a kvartett egy oszthatatlan építőkö, amit azonos pályán lévő nukleonok alkotnak, akkor egy fenomenologikus algebrai kvartettmodellhez jutunk, míg a szimmetrián alapuló kvartettek alapozva félmikroszkopikus modellt nyerhetünk [19]. Félmikroszkopikusnak az olyan leírást hívjuk, ami tekintetbe veszi a Pauli-féle kizárási elvet (más szóval: a modelltere mikroszkopikusan van megszerkeszt-





ve), de modellkölcönhatásokat alkalmaz. A fenomenologikus leírás nem (feltétlenül) tud a Pauli-elvről. (A teljesen mikroszkopikus modellek pedig nemcsak a Pauli-elvet tartalmazzák, hanem a kölcsönhatásaik is mikroszkopikusak, vagyis nukleon-nukleon erők).

A kvartettmodell fontos kapcsolatot teremt a héjmodell és a fűrtmodell között. Ez teljesen természetes, ha arra gondolunk, hogy a legismertebb klaszter, amit a fűrtmodellben alkalmaznak az alfa-részecske, vagyis a  ${}^4\text{He}$  mag, amit két proton és két neutron épít fel. Egy kvartettet pedig szintén két proton és két neutron alkot. Az lenne tehát a meglepő, ha nem lenne közük egymáshoz. Hogy pontosan mi a kapcsolatuk, azt ismét a szimmetriavizsgálatok derítették ki.



Időközben a magmodellek sokat fejlődtek, és a természet leírását ma már sokkal realiztikusabban tudjuk megadni. Általánosították Elliott  $\text{SU}(3)$  modelljét is, a következőképpen. A héjmodell onnan kapta a nevét, hogy az átlagpotenciálban kialakuló egyrészecske-állapotok héjakba tömörülnek. Vagyis néhányan egymáshoz energiában nagyon közel esnek, örö-

luk azt mondjuk, hogy egy főhéjat alkotnak, aztán következik egy nagy szünet, és a másik főhéj már lényegesen nagyobb energiához tartozik. Elliott modellje egyetlen főhéjat kezel, a valenciahéjat, a legkisebb energiájú, részben betöltött héjat. Ma már ismeretes a sok főhéjat együttesen ke-

különböző konfigurációi között is [24], vagy egy klaszterkonfiguráció és egy héj- (vagy kvartett) konfiguráció között. Ezért aztán a jelentősége nem pusztán elvi jellegű, hanem praktikus szempontból is nagyon figyelemre méltó, ugyanis nagyon jelentős prediktív ereje van. Képes például arra, hogy egy mag kisenergiás spektrumát a héj- (vagy egyszerűbben a kvartett) modell nyelvén leírva, abból megjósoljon egy magasan fekvő klaszterspektrumot kellő részletességgel (az állapotok energiáit és a közöttük lezajló elektromágneses sugárzások intenzitását) [25]. Erre mutat példát az ábra.

## Összegzés

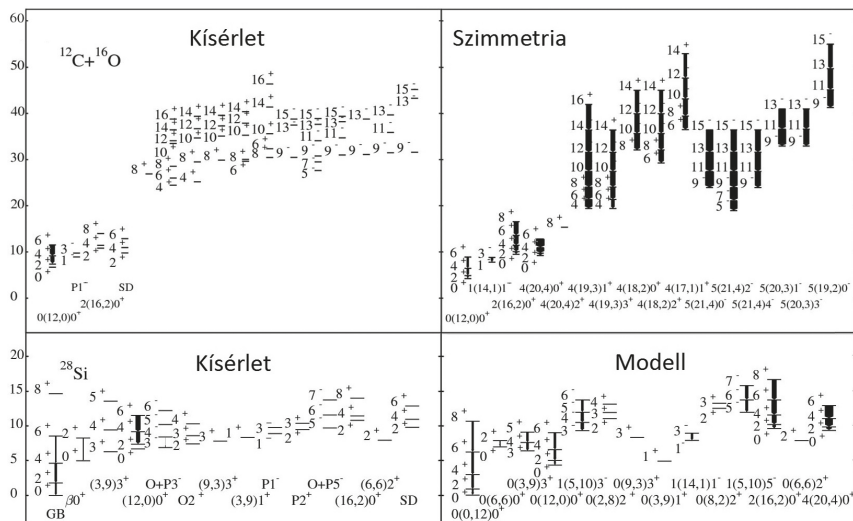
Az elmondottakból úgy tűnhet, a szimmetriák a fizika csodafegyverei abban a békés de nagyszabású küzdelemben, amit a természet megismeréséért folyta-

## A magszerkezetmodellek összefüggése

Mivel a magszerkezet leírása különböző (bolygórendszer, folyadékcsepp, fűrt...) modelleken alapul, ezért elengedhetetlen, hogy feltárjuk azok egymáshoz való viszonyát, megkeressük közös részüket. Enélkül megértésünk több mint hiányos lenne. A feladat a szimmetriájuk tanulmányozásával oldható meg.

Az alapvető felismerés még 1958-ból származik. Elliottnak sikerült a héjmodellben értelmeznie olyan kollektív tulajdonságokat, mint a (kvadrupólus) deformáció és a magok forgása [12]. Ez igazi fronttörés volt! A gömbszimmetrikus potenciálban mozgó néhány nukleon nyelvén számot tudott adni olyasmiről, amit addig csak egy egészen eltérő képből, a cseppmodell keretében tudtunk elképzelni. Mint kiderült: az  $\text{SU}(3)$  szimmetria egyértelműen megszabja a mag alakját: lehet gömbölyű, megnyúlt, belapult, vagy olyan ellipszoid, aminek három tengelye más-más hosszúságú. A rotációs állapotokat (sávot) pedig az egy  $\text{SU}(3)$  szimmetriához tartozó állapotok adják.

Ugyanebben az évben fogalmazta meg Wildermuth és Kanellopoulos [20] a fűrtmodell egy olyan szemléletes módon, ami a praktikus számításoknak is kedvezett, és hamarosan kiderült, hogy a fűrtmodell és a héjmodell közös részét szintén az  $\text{SU}(3)$  (dinamikailag sérült) szimmetria adja. Vagyis: a héjmodellállapotok közül e szimmetria segítségével tudjuk kiválasztani azokat, amelyek egyik vagy másik klaszterkonfigurációnak felelnek meg, és ezeknek az állapotoknak ismerjük a deformációját is, meg a rotációs családját is [21].



**A 28Si spektrumának leírása a sokcsatornás dinamikai szimmetriával. Az energiaskála MeV-ben értendő. Alsó rész: bal oldalt a kisenergiás kísérleti spektrum látható, jobb oldalon az algebrai kvartettmodell spektruma. Felső rész: a 12C+16O klaszterspektrum. A kisenergiás rész az alsó spektrumok részleteinek ismétlése. A jobb oldali modellspektrum a szimmetria jóslata, a kisenergiás spektrum extrapolációja (!). A bal oldal mutatja a 12C+16O reakcióban kísérletileg talált állapotokat. Az állapotok közötti nyilak az elektromágneses átmeneteket mutatják, vastagságuk az intenzitással arányos**

ző algebrai modell is [22]. A magállapotok realiztikus leírásához tekintetbe kell vennünk a főhéjgerjesztéseket is. Mi a kiterjesztett héjmodell viszonya a kollektív és fűrtmodellhez? Az derült ki, hogy a három alapvető szerkezetmodell közös metszete a sokfőhéj-közelítésben is egy (dinamikailag sérült) szimmetria,  $\text{SU}_s(3)$   $x\text{SU}_x(3)$  algebrai szerkezettel (ahol az  $s$  az alapállapotra utal, míg  $x$  a gerjesztést jelöli) [23]. Ugyanez a szimmetria, amit sokcsatornás dinamikai szimmetriának hívunk, teremt kapcsolatot a fűrtösödés

tunk. Ha ez a kis írás ilyen benyomást keltett, akkor az azért van, mert valóban ez a helyzet.

Szemléltetésül itt a magfizikai alkalmazások közül említettünk néhány példát annak kapcsán, hogy az idén 80 éves Wigner szupermultiplétt-elmélete. Máig tartó hatását jól jellemzi egy önkéntelen megjegyzés a magyar magfizikai kutatás egyik úttörőjétől, a maguságy viselkedésének nemzetközileg kiemelkedő szaktekinélyétől. Angeli tanár úr így fogadta a magszerkezet legújabb áttekintő összefoglalását, ami

nemrégiben jelent meg: „eddig nem is tudtam, hogy az egész magszerkezet csupa csoportelmélet” [26].

Az itt bemutatott szimmetriák mind egy családba tartoznak, Lie-csoportokkal írhatók le. Csábító volna megemlíteni néhány újabb szimmetriafajtát, ami szintén nagy jelentőségre tett szert (például szuperszimmetria, mértékszimmetria). Ezt azonban terjedelmi korlátok nem engedik meg, ezért pusztán a létük megemlítésére szorítkozunk.

Összegzésként megállapíthatjuk: furcsa betegsége a fizikának a sokat emlegetett csoportvész (a német és angol nyelvű szakirodalom egyenesen csoportpestisnek nevezte). Nem ártalmas, hanem ellenkezőleg: hasznára van. Ha már fertőzés, akkor leginkább talán a mitochondriumok történetére emlékeztet: az összejtet (feltehetően) megtámadta egy baktérium, de a küzdelemben egyikük sem pusztult bele, hanem olyan szoros együttműködés alakult ki közöttük, hogy ma már nem tudnának egymás nélkül megélni.

*A jelen munka az (K112962 témaszámú) OTKA támogatásával készült.*

## Irodalom

- [1] E.P.Wigner, Nobel Lecture 1963; Szimmetriák és reflexiók (ford: Györgyi G.) Gondolat Kiadó, Budapest, 1972.
- [2] E. P.Wigner, Gruppentheorie und Ihre Anwendung auf die Quantenmechanik der Atomspektren, Braunschweig, F. Vieweg und Sohn, 1931; Csoportelméleti módszer a kvantummechanikában (ford: Györgyi G, Sebestyén Á.) Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979.
- [3] E.P.Wigner, Ann. Math. 40, 149 (1939).
- [4] Györgyi G, Fizikai Szemle 1968, 142; 1971, 205.
- [5] Gyarmati B, magánközlés.
- [6] W. Heisenberg, Z. Phys. 77, 1 (1932).
- [7] E.P.Wigner, Phys. Rev. 51, 106 (1937).
- [8] L. Eisenbud, G.T. Garvey, E.P. Wigner, Az atommag szerkezete (ford. Györgyi G.) Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969.
- [9] D.D. Warner, M.A. Bentley, P. van Isacker, Nature Phys. 2, 311 (2006).
- [10] F. Gürsey, A. Pais, R.A. Radicati, Phys. Rev. Lett. 13, 299 (1964).
- [11] L.A. Radicati, in Symmetry properties of nuclei, Proc 15th Solvey Conf. in Physics, 1970, Gordon and Beach Science Publisher, London, 113 (1971).
- [12] J.P. Elliott, Proc. Roy. Soc. 245, 128; 562 (1958).
- [13] F. Iachello, Phys. Rev. C 23, 2778 (1981).
- [14] J. Cseh, Phys. Lett. B 281 (1992) 173; J. Cseh, G. Lévai, Ann. Phys. (NY) 230 (1994) 165.
- [15] F. Iachello J. Cseh, G. Lévai, APH N.S. Heavy Ion Phys. 1, 91 (1995).
- [16] Iachello F, Arima A, The Interacting Boson Model, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- [17] A. Arima, V. Gillet, J. Ginocchio, Phys. Rev. Lett. 25 1043 (1970).
- [18] M. Harvey, Nucl. Phys. A 202, 191 (1973).
- [19] J. Cseh, Phys. Lett. B 743, 213 (2015).
- [20] K. Wildermuth, Th. Kanellopoulos, Nucl. Phys. 7, 150 (1958).
- [21] B.F. Bayman, A. Bohr, Nucl. Phys. 9, 596 (1958/59).
- [22] G. Rosensteel, D.J. Rowe, Phys. Rev. Lett. 38, 10 (1977).
- [23] J. Cseh, J. Phys. Conf. Ser. 580, 012046 (2015).
- [24] J. Cseh, Phys. Rev. C 50, 2240 (1994).
- [25] J. Cseh, G. Riczu, Phys. Lett. B 757, 312 (2016).
- [26] D.J. Rowe, J.L. Wood, Fundamentals of Nuclear Models, World Scientific Pub. Co., Singapore, 2010.

VARGA IMRE

# A Wigner–Dyson-osztályozás és az Anderson-féle fém-szigetelő átmenet

**M**ajdnem hatvan évvel ezelőtt jelent meg P.W. Anderson alapcikke, amiben azt állapította meg, hogy jól vezető anyagot létrehozó atomok rendezetlenség, szennyezettség jelenlétében, vagy amorf szerkezetben akár szigetelő tulajdonságot is mutathatnak. Vagyis egy olyan anyagban, ami ideális esetben, tehát tisztán és rács hibáktól mentesen nagyon jól vezet az elektromos áramot és ennek megfelelően a hőt is, bizonyos mértékű szennyezettség, vagyis rendezetlenség esetén egyáltalán nem vezet az áramot.

Sokáig az volt az elképzelés, hogy a rendezetlenség növelésével a vezetési képesség folyamatosan csökken. De ebben a

dolgozatban Anderson éppen arra mutatott rá, hogy a rendezetlenség egy bizonyos értéke felett a vezetőképesség hirtelen tűnik el, vagyis ez a rendszer hirtelen válik szigetelővé. Egy ilyen átalakulás drámai változás, és egyszerű, az eredeti rendszer tulajdonságát csak zavartkeltő módon, úgy mondjuk, hogy perturbatív módon kezelni nem is lehet. Ilyen esetben egy valóságos fázisátalakulás következhet be a rendezetlenség növekedésével. Ráadásul nem a szokásos hőmérséklet az, ami a fázisátalakulást mozdítja elő, ugyanis P.W. Anderson művében teljesen koherens kvantummechanikai rendszert tételezett fel, vagyis a hőmérséklet zérusnak tekinthető. Ezt

a fázisátalakulást egyúttal a rendszerbeli elektronikus állapotok drasztikus változása is kíséri: a fémszerű fázisban főként a vezetésben részt vevő, a Fermi-energia közeli állapotok az egész anyagra kiterjedtek, vagyis az elektromos áram közvetítésére alkalmasak, még akkor is, ha a rendezetlenség hatására erre már igen rossz hatékonysággal képesek. A szigetelő fázisban az elektronok olyan állapotokban vannak, amelyek az anyag belsejében, néhány tucat vagy csak néhány rácshely, atom környezetében találhatóak, úgy mondjuk, hogy lokalizáltak. Ez utóbbi állapot a kisebb tartományban konstruktív interferencia révén marad *bezárva*, míg távolabbra a destruktív interferencia



nem engedi *eljutni*. Úgy tűnik, hogy ez az ún. Anderson-lokalizáció, ami a rendezetlenség folyamánya, egy tisztán kvantummechanikai jelenség. Klasszikus, szemi-klasszikus modellekkel nem lehet kielégítően leírni, így hát tisztán kvantummechanikai módszerekkel, a Schrödinger-egyenlet megoldásával, illetve a rendszert meghatározó és – időfüggetlen esetben – teljesen leíró Hamilton-operátor sajátérték-problémájának megoldásával lehet és kell értelmezni.

Az Anderson-féle átalakulást idővel sok rendszeren sikerült kísérletileg is kimutatni és igen sok fizikai folyamatban játszik lényeges szerepet. Ennek egyik legfőbb oka az, hogy az ideális kristályszerkezet vagy a teljesen tiszta, szennyezésmentes anyag igazából a kivételt képezi még akkor is, ha a legáltalánosabb, legprecízebb leírást éppen az ideális esetben tudunk adni. A rendezetlenség P.W. Anderson 1958-ban publikált tanulmánya óta igen sokfajta, de esetenként újfajta meg gondolat, valószínűségi értelmezést tett szükségessé.

Nem is az a legfontosabb, honnan ered a rendezetlenség, milyen az egyedi megvalósulása. Még az is lényegtelen, hogy egyes minták, milyen viselkedést mutatnak, amikor a mérhető mennyiségek átlaga, szórása vagy akár teljes eloszlás függvénye univerzalitást mutat.

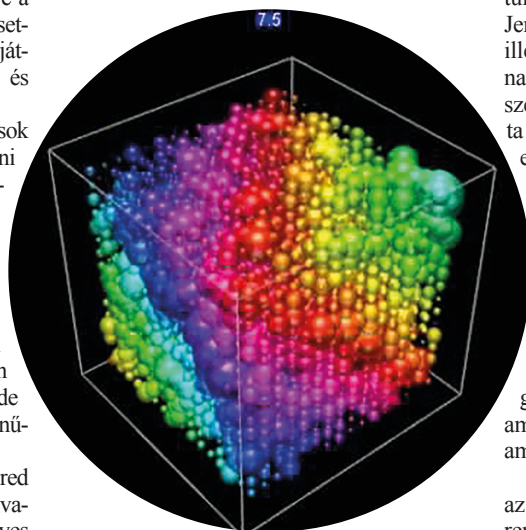
További lényeges vonása ennek a jelenségkörnek, hogy az átalakulás környezetében a rendszer méretével és más paramétereivel változó, ún. egy-paraméteres skálázás kap szerepet, ami ennek a fázisátalakulásnak a sajátja. Ez a skálázás arra utal, hogy a rendszerméret változtatásával a termodinamikai határesetben milyen viselkedést mutat a rendszer. Például háromdimenziós esetben, ha a szigetelő fázisban levő,  $L$  élhosszúságú kockát készítünk, akkor kétszer akkora élhosszúság mellett 'még inkább' szigetelőt kapunk. Hasonlóan az  $L$  élhosszúságú, fémcs fázisú rendszerből  $2L$  élhosszúságút építve még inkább fémcs tulajdonságú rendszert kapunk. Azonban éppen a kritikus pontban méretfüggetlen viselkedést láthatunk, amit skálafüggetlenségként is szoktunk jellemezni. A kritikus ponthoz közelítve mindkét oldalról egy hossz dimenziójú mennyiség, pl. lokalizációs hossz, vagy korrelációs hossz hatvány függvény szerint divergál és ennek a kitevője a fázisátalakulást jellemző fontos exponens.

Vannak kísérleti eredmények is de a numerikus és kísérleti exponensek eltérnek egymástól. A vezetőképeség mérésen alapuló kísérletek erre az említett kitevőre közelítőleg egyet adnak, míg a numerikus kísérletek, szimulációk még a Wigner-Dyson-osztályozástól függő értékre vezetnek, de egynél mindenképpen nagyobb.

De lássuk, mit jelent a Wigner-Dyson-féle osztályozás.

## A véletlen mátrix elmélet

A véletlen mátrix elmélet egy olyan matematikai problémakör, amelyet – mint már oly sokszor – a fizika indított, fejlesztett és inspirált hosszú ideig. Nagyon sok alkalma-



zása van a számelmélettől, a prímszámok viselkedésétől a fekete lyukak véges entropiájának értelmezésén át a gyalogosok egymáshoz viszonyított mozgásán, a parkoló gépjárművek közötti távolságokon, a tőzsdei részvények értékének fluktuációiban tapasztalható korrelációkon keresztül akár a rendezetlen rendszerek vezetési tulajdonságaiig, vagy a klasszikusan kaotikus mozgások kvantummechanikai viselkedéséig. Ez olyan matematikai formalizmus, ami többféle formában nagyon sok esetben előfordulhat.

Alapesetben minden olyan problémára alkalmazható, ahol lineáris egyenletek megoldásánál szerepet játszó mátrixok általános, globális tulajdonságai, szimmetriái már a konkrét mátrixelemek ismerete nélkül is bizonyos előzetesen ismert, univerzalitást eredményeznek. Wigner például 1955-ben, tehát P.W. Anderson lokalizációval kapcsolatos munkájával körülbelül egyidőben vezette be ezt a matematikai statisztikai módszert olyan nagyon bonyolult fizikai kísérletek értelmezésére, amiknél már akár a mátrixelemek kiszámítása, meghatározása is problémát jelentett.

Wigner Jenő nehéz atommagok neutron ütközése nyomán keletkező rezonanciákkal foglalkozott, ami természetesen további információkkal szolgált az atommagok belső tulajdonságairól. Wignerről bizonyosan tudni lehetett, hogy nem riadt vissza, ha valamilyen nehéz matematikai probléma került elé és megpróbálta megoldani. Ez esetben olyan kísérleti adatok elemzésébe fogott, ami újszerű hozzáállást tett szükségessé. A kísérletek szerint a nehéz atomma-

gokban található számos nukleon (proton és neutron) kötött állapotát erősen „megrázó”, azzal ütköző neutron olyan bonyolult gerjesztett állapotot hozott létre, ami a korabeli számítási lehetőségekhez, illetve matematikai modellekhez viszonyítva is túlságosan összetettnek tűnt. Ezért Wigner Jenőnek az jutott eszébe, hogy az összetett, illetve komplex állapotokhoz tartozó rezonanciák energia szerinti eloszlását véletlenszerűnek tekintette és például meghatározta az egymást követő rezonanciák közötti energia távolságok eloszlását. Azt találta, hogy ezen energia különbségek előfordulási valószínűsége az energiakülönbséggel csökkent, bizonyos esetekben arányosan, de volt, hogy kvadratikusan. Vagyis a komplex magok energianívói mintha taszítanák egymást, nem tudnak tetszőlegesen közel kerülni egymáshoz. Persze a túlságosan nagy energiakülönbségek gyakorisága is alacsony, amivel egy olyan eloszlásfüggvény adódik, aminek egy púpja van.

A véletlen mátrix elmélet alkalmazása az atommagok és más, hasonlóan bonyolult rendszerek esetében is azon alapul, hogy a Hamilton-operátort, vagyis a teljes energiát leíró kvantummechanikai operátort olyan mátrixszal írjuk le, aminek egyes elemei véletlenszerűek és csak az adott rendszer általános szimmetriáit tükrözi. Ilyen szimmetria az időtükrözési szimmetria, illetve a spin-forgatási szimmetria. Mint később kiderült, még további globális szimmetriák is szerepet játszhatnak. Összesen tíz olyan osztálya van a lehetséges rendszereknek, amelyek valamilyen index alapján azonosíthatóak. A töltés konjugáció (részecske-antirészecske csere), a paritás (jobb-bal felcserélhetőség), illetve általában az időtükrözés az, ami ezeket az osztályokat megkülönbözteti. Azonban az esetek nagy többségénél még mindig a Wigner és Dyson által közösen meghatározott hármas csoport, a hármas út az, ami előfordul.

A Wigner-Dyson-féle három sokaság, csoport egy egész számmal jellemezhető, ami lényegében nem más, hogy hány darab valós szám szükséges például a Hamilton-operátort reprezentáló mátrix egy elemének leírásához. Vagyis ez a szám, amit Dyson-indexként is ismer az irodalom, éppen 1, ha minden mátrixelem valós, 2, ha komplex és 4, ha kvaternió. Az első és harmadik esetben az időtükrözés egy jó szimmetria, míg a másodikban a rendszer nem invariáns vele szemben. A harmadik esetben a kvaternió leírás kissé furcsának tűnik. Azonban ilyen esetben minden mátrix elem tulajdonképpen a  $2 \times 2$ -es mátrixokkal írható le, aminek a legáltalánosabban az egységmátrix, illetve a három Pauli-mátrix adja a bázisát. Mint ismeretes, a Pauli-mátrixok éppen a spin jelenlétében kapnak fontos szerepet, így nem meglepő, hogyha

például spinpálya-csatolás miatt a különböző spinű fermionok másképp viselkednek, vagyis sérül a spin forgatási szimmetria. Természetesen a fenti osztályozásban az első osztályban a rendszer mind az időtükrözéssel, mind pedig a spinforgatással szemben is ugyanolyan marad, vagyis invariáns.

A véletlen mátrix elmélet egyik legfontosabb alapelve az, hogy felejtjük el a mikroszkopikus részleteket, vagyis a rendszert leíró mátrix elemeit vegyük véletlenszerűnek, és ne nézzük, milyen bonyolult és nehézkes úton lehet az elemeket analitikus úton kiszámítani. Ezek után csak a mátrix általános tulajdonságai mérvadóak, vagyis az csak a kérdés, hogy például egy Hamilton-mátrix valós szimmetrikus, komplex hermitikus, vagy kvaternió hermitikus, illetve még további lehetőségek is vannak, de a felsorolt három eset az az alap, amit a Wigner–Dyson-elmélet vizsgált. Érdekes megjegyezni, hogy ha például egy komplex hermitikus mátrix minden elemének képzetes részét kinullázzuk, akkor egy valós szimmetrikus mátrixhoz jutunk, mégis, ez a két halmaz lényegesen különbözik egymástól. Például az időtükrözésre szimmetrikus rendszerekhez mindig lehet valós szimmetrikus mátrixot rendelni, de ahol az időtükrözés sérül, abban az esetben biztosan nem lehet, csak komplex hermitikus mátrixot.

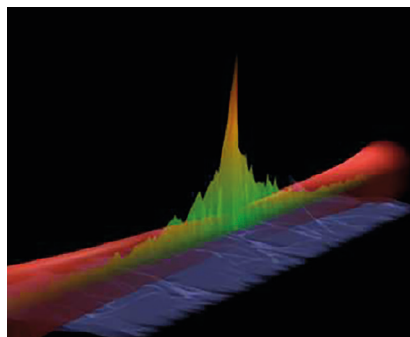
### A véletlen mátrix elmélet kapcsolata az Anderson-féle átmenettel

Nézzük meg, mi történik, ha ezt a két problémakört összekötjük. Milyen hatással van a véletlen mátrix elmélet az Anderson-féle átmenet vizsgálatára? Milyen általános osztályozásra van mód? Abban az esetben, ha csak egy rendezetlen rendszert vizsgálunk úgy, hogy a benne szereplő elektronok spinje érdektelen, illetve nincsenek más hatások, akkor a rendszer Dyson-indexe 1. Ha állandó, külső mágneses térbe helyezzük ezt a rendezetlen rendszert, akkor a Dyson-index 2 és ilyenkor a mágneses tér hatására sérül az időtükrözési szimmetria. Végül, ha a résztvevő elektronok spinje egy spinpálya-csatolás miatt már lényeges szerepet, amivel a spin forgatási szimmetria sérül – de ilyenkor külső mágneses tér nincsen –, akkor a Dyson-index 4. Ez az osztályozás természetesen akkor is működik, ha a mátrixelemek nem általában független véletlen változók, hanem nagyjából előre meghatározottak. Például P.W. Anderson modellje olyan, hogy csak a diagonális elemek, tehát a főátlóban szereplő elemek véletlenszerűek, a nem-diagonálisak viszont jól meghatározott értéket vesznek fel. Érdekes megjegyezni, hogy az alkalmazott kö-

zelítéstől függően a nem-diagonális elemek jól visszatükrözik a rendszer topológiáját is. Vagyis sok ilyen mátrixelem zérus, és csak ott szerepel nullától különböző érték, ami annak a rácsnak a tulajdonsága, amiben az elektronok mozognak. Ez a rács lehet 1-, 2- vagy 3-dimenziós és lehet négyzetes vagy köbös, vagy más struktúrájú. Sajátos tulajdonsága az Anderson-féle átmenetnek, hogy alacsonyabb dimenzióban, azaz vonalszerű és síkszerű rendszerekben nem jön létre, csak kettőnél magasabb dimenziójú rendszerekben.

A fentiek figyelembe vételével elmondható, hogy a rendszer beágyazó dimenziótól és az ún. Dyson-indextől függően kapunk olyan osztályokat, sokaságokat, amelyekben belül univerzális viselkedést várunk, vagyis az Anderson-féle átmenetet leíró további hatványkitevők és más mennyiségek is függetlenek a modell részleteitől.

A különböző dimenziójú és Dyson-indexű osztályokhoz tartozó univerzális viselkedés felderítésére numerikus simulációkat lehet végezni. Ezek a simulációk már a múlt század kilencvenes éveitől egyre nagyobb pontosságú eredményeket szolgáltatnak. Több lehetőség is mutatkozik arra, hogy az Anderson-átmenethez tartozó univerzális viselkedést vizsgáljuk.



*Az ún. transzfer mátrix technológia.* Ennek lényege, hogy veszünk egy  $d-1$  dimenziós keresztmetszetű nagyon hosszú rudat és nézzük, hogy a keresztmetszet szélesítésével, illetve elegendően hosszú rúd választásával milyen átviteli képességű, azaz vezetési tulajdonságú a rendszer. Sokáig ez volt a legpontosabb módja az Anderson-átmenet vizsgálatának. Szerencsére vannak matematikai tételek, amik segítségével egy-paraméteres skálázás.

*A spektrál statisztika módszere.* Ez a módszer már nagyon közel áll a véletlen mátrix elmülethez, mert annak technikáját alkalmazza az Anderson-féle modellre. Itt  $L$  élhosszúságú,  $d$ -dimenziós kockát vizsgálunk, de csak a sajátértékeinek a statisztikus tulajdonságait. Például az egymást követő energiaszintek eloszlásfüggvényének vizsgá-

lata is jó a fém-szigetelő átmenet vizsgálatára, mert a lokalizált fázisban a sajátállapotok csak elhanyagolható mértékben lapolják át egymást, tehát a hozzájuk tartozó energianívók akármilyen közel kerülhetnek egymáshoz. A vezető fázisban azonban az állapotok nagyjából az egész rendszerre kiterjedtek, vagyis ilyenkor a hozzájuk tartozó energiaszintek a véletlen mátrix elmélet szerint „taszítják” egymást. Ezt a két extrém esetet csak a termodinamikai határesetben lehet pontosan látni, véges rendszeren valamilyen közelítéssel. Szerencsére véges méret skálázással megkapható a kritikus pont és a környezetében tapasztalható univerzális viselkedés.

*Multifraktáls állapotok analízise.* Az Anderson-féle átmenet egy érdekes vonása, hogy az előbb említett két fázisban viszonylag könnyen azonosítható sajátállapotokkal rendelkezik, tehát a vezető fázisban az egész rendszeren végig futó kiterjedt állapotok jellemzik, míg a szigetelő fázisban inkább erősen lokalizált, a teljes rendszerenél kisebb térrészen található a sajátállapotok. Ezzel szemben a kritikus pontban, illetve kritikus energiákon az elektronok sajátállapotai nagyon furcsák: egyszerre lokalizáltak és kiterjedtek, vagyis lyukacсос, helyenként nagyobb eséllyel fordul elő, de akár az egész rendszeren végigfut, viszont imitt-amott egész nagy térrészen teljesen eltűnik. Ezekre az állapotokra leginkább az ún. multifraktál leírás illeszkedik. A legutóbbi időkben már lehetségessé vált, hogy a kritikus pontban található multifraktál tulajdonságú állapotokból is kimutatható legyen az Anderson-féle átmenetre jellemző univerzalizitás, sőt még további részletek is kiszámíthatók ebben a tartományban.

Nézzük meg, hogy a különböző Dyson-indexű osztályok esetén, milyen exponenseket lehet kapni, mindezt úgy, hogy háromdimenziós egyszerű köbös rácsot tételezünk fel. A legegyszerűbb esetben, tehát a lokalizációs hossz divergenciáját leíró kitevő kb. 1,6. Ha a Dyson-index 2, akkor már az exponens kisebb, kb. 1,43 és a harmadik esetben, Dyson-index egyenlő 4 esetén a kitevő már csak 1,37. Látható, hogy a kitevők a három esetben nem sokkal térnek el egymástól, és bár korábban a számítási hibán belül megegyeztek, azonban a legújabb és legpontosabb eredmények szerint a három értékhez tartozó statisztikai hiba kisebb, mint a köztük mért távolság, tehát valóban különböznek egymástól. Ezzel szemben a különböző módszerekkel meghatározott kitevők hibahatáron belül megegyeznek.

Mind a három technológia arra épül, hogy ki kell számítani egy olyan mennyiséget, ami a fázis átalakulás egyik oldalán a termodinamikai határ elérésekor egyfajta értéket vesz fel, míg a másik oldalon egy másikat. Többnyire ilyen mennyiségek a



kritikus pontban a két érték közötti ugyan-csak a rendszer méretétől független értékhez tartanak. Ezekből a számításokból lehet meghatározni az ún. skálafüggvényt, illetve ennek következtében a lokalizációs hossz-nak a kritikus ponthoz közelítő divergenci-áját leíró hatványfüggvény kitevőjét.

Kissé misztikus, hogy a numerikus szimulációk miért vezetnek viszonylag nagy pontossággal három különböző értékhez, ezek miért csökkennek a Dyson-index növe-lésével, illetve miért térnek el olyan nagymér-tékben a kísérletileg a fázis átalakulások sok-szor tapasztalható egységnyi értéktől.

## E számunk szerzői

DR. ABONYI IVÁN, a fizikai tu-dományok kandidátusa, Budapest; ÁDÁM PÉTER fizikus, PhD, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Kvantumoptikai és Kvantumin-formatikai Osztály, Budapest; DR. CSEH JÓZSEF fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó, MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen; DR. CSEHI ANDRÁS fizi-kus, ELI Elméleti és Számítógépes Molekulaszerkezet és Dinamikai Csoport, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi adjunktusa, Debrecen; DR. DOMO-KOS PÉTER akadémikus, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; DR. GADÓ JÁNOS, az MTA doktora, MTA Energiatudomá-nyi Kutatóközpont, professor emeritus, a V4G4 Centre of Excel-lence elnöke, Budapest; DR. HOR-VÁTH DEZSŐ, MTA Wigner FK, Budapest és MTA Atomki, Debrecen; DR. HALÁSZ GÁBOR fizikus,

egyetemi tanár, Debreceni Egyetem In-formációtechnológiai Tanszék, Debrecen; DR. HÓZER ZOLTÁN, MTA doktora, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest; DR. KISS TAMÁS fizikus, PhD, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Kvantumoptikai és Kvantuminformatikai Osztály, Budapest; DR. KONIORCZYK MÁTYÁS fizikus, PhD, Pécsi Tudomá-nyegyetem Természettudományi Kar, Alkal-mazott Matematika Tanszék, Pécs; DR. PALÁGYI GYÖRGYNÉ tanár, Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium; DR. RADNAI GYULA fizikus, ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék, Budapest; DR. SOLT GYÖRGY elméleti fizikus, Zug, Svájc; DR. SÓLYOM JENŐ akadá-mikus, professor emeritus, ELTE–MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; DR. VARGA IMRE egyetemi docens, BME Elméleti Fizika Tanszék, Buda-pest; DR. VIBÓK ÁGNES fizikus, az ELI Elméleti és Számítógépes Molekulaszerkezet és Dinamikai Csoport vezetője, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi tanára, Debrecen;

## Decemberi számunkból

*Hérincs Dávid:* Tíz hurrikán egyhu-zamban

*Szabados László:* Galaxishalmazok faggatása. Miről árulkodik a galaxisok közötti térség vastartalma?

*Varga Péter:* Legrégebbi ismertnek vélt földrengésünk: Savaria, 455

*Pátkai Zsolt:* 2017 nyarának időjárása

*Szabad János:* Miként ketyeg a belső óra? Fiziológiai és orvostudományi Nobel-díj 2017

*Venetianer Pál:* Modellszervezetek a biológiában

GADÓ JÁNOS

# Negyedik generációs gázhűtésű gyorsreaktor

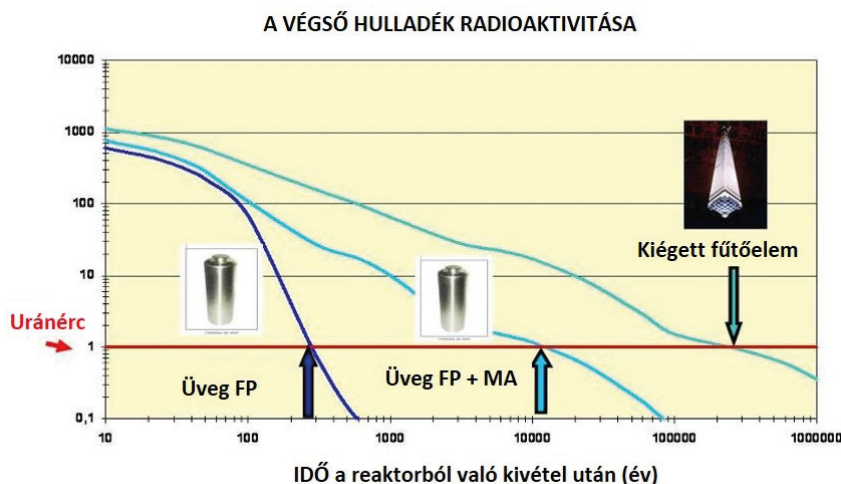
**M**agyar kutatók egy csoportja, nemzetközi projekt keretében, több éve foglalkozik az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor fejlesztésével. A cikk először a gyorsreaktor fejlesztés általános céljait és a fejlesztés jelenlegi nemzetközi helyzetét tárgyalja, majd bemutatja a gázhűtésű gyorsreaktor specifikumait, az ALLEGRO projekt kereteit és a projekt aktuális helyzetét.

## Új technológia

Az atomreaktorok köztudomásúan a maghasadáson alapuló, szabályozott lánreakcióban keletkező energiát hasznosítják. Az

atomerőművek kezdetektől fogva egészen a mai napig és a közeljövőben is olyan módon működnek, hogy a maghasadásban keletkező 1-10 MeV energiájú ún. gyors neutronokat a reaktorban lelassítják 0-1 eV ún. termikus energiára, ahol a neutronok igen jó eséllyel újabb maghasadásokat keltenek. Ezeket a reaktorokat termikus reaktoroknak nevezzük. A neutronokat lassító közeg lehet grafit, vagy egyszerűen víz, ami egyben a reaktor hűtőközegül is szolgál. A hűtőközeg felmelegedése révén hasznosul a maghasadásban keletkező energia, és a keletkező gőz azután a hőerőművekben szokásos turbinákon és generátorokon keresztül villamosenergia termelést teszi lehetővé.

Már a reaktorok fejlesztésének legke-zetibb szakaszán felismerték, hogy a termikus reaktorok mellett kifejleszthetők lehetnek olyan ún. gyorsreaktorok is, amelyek a gyors neutronokat közvetlenül használják újabb maghasadások keltésére. Ebben az esetben természetesen a neutronok lassítása elkerülendő, viszont megfelelő hűtőközegekről mindenképpen gondoskodni kell. Mivel a kis tömegszámú atommagok (elsősorban a hidrogén) erősen lassítják a neutronokat, ezért a hűtőközeg csak viszonylag magas tömegszámú atommagokat tartalmazó anyag lehet, amelynek termodinamikai tulajdonságai (pl. olvadáspont, forráspont, hőkapacitás) megfelelőek. Így csak kevés anyag jön szóba, gya-



1. ábra. A nagyaktivitású hulladék bomlásának időfüggése

korlatilag a nátrium és az ólom. Lényegesen eltérő hűtőközeg lehet az arra alkalmas gáz is (pl. a hélium, amelynek kis tömegszáma a kis sűrűség miatt nem okoz lassítási problémát).

A gyorsreaktorok kifejlesztése, mint látni fogjuk, nagyon sok olyan műszaki probléma megoldását igényli, amelyek a termikus reaktorok esetében nem léteznek. Ugyanakkor a gyorsreaktoroknak van egy igen nagy előnyük, nevezetesen az, hogy alkalmasak a termikus reaktorokban keletkező nagyaktivitású hulladék elégetésére és reaktorokban hasznosítható hasadó anyagok létrehozására. Ennek az az oka, hogy az 1-10 MeV-es energiatartományban a transzurán izotópok neutronos magreakciókra való hajlama (hatáskereszmetszete) egészen más, mint termikus energiákon.

E célok eléréséhez alapvetően szükséges a reprocesszáló berendezés. Ebben a berendezésben a reaktorok fűtőelemeit, amelyek a hasadóanyagot és a nagyaktivitású hulladék (azaz a továbbiakban nem hasznosítható anyagok) zömét tartalmazzák, kémiai módszerekkel alkotóelemeire lehet bontani és az egyes anyagokat egymástól elkülönítve lehet kinyerni. A reprocesszáló berendezés eredeti célja a reaktorokban termelt plutónium, az ideális atombomba-alapanyag kinyerése volt. Emiatt az eddig használt reprocesszáló berendezések biztonsági szempontból rendkívül veszélyesek. Jelenleg folyik egy olyan kémiai eljárás kifejlesztése, amelynek eredményeképpen a plutónium és az urán együtt válna ki, ami ezt a veszélyt nagymértékben csökkenti vagy megszünteti. Persze, a reprocesszáló berendezések nem csak sugárvédelmi, de kémiai szempontból is veszélyesek. Ezt a veszélyt a pirótechnikai módszer alkalmazása a nedves eljárás helyett jórészt kiküszöböli.

A plutónium és az urán leválasztása után visszamaradó nagyaktivitású anyag nem teljes mértékben tekintendő hulladéknak, mert abban még hasadó transzurán izotópok (neptúnium, amerícium, kúrium izotópok) is találhatóak. A nagyaktivitású anyag hosszú távon sem lebomló részét éppen a kúrium izotópok dominálják. A transzurán izotópok leválasztásának módszere ma még kísérleti stádiumban van, de ez bizonyosan megvalósítható.

Ha sikerül egy olyan megbízható és kevésbé veszélyes reprocesszálási eljárást kidolgozni, amelynek eredményeképpen az urán, plutónium és a transzurán izotópok kinyerhetőek, akkor a maradék anyag hosszú távú aktivitása drámai módon csökken, és a nagyaktivitású hulladék aktivitása százezer év helyett néhány száz év alatt visszaesik a természetben található uránérc aktivitásának szintjére, amint azt az 1. ábra mutatja (FP: hasadási termékek, MA: transzurán izotópok).

A reprocesszálás során kinyert plutóniumot természetesen nem csak atombombában lehet felhasználni, hanem termikus reaktorokban is. Igen gyakori (elsősorban Európában), hogy a fűtőelemek alapanyaga az  $UO_2$  helyett az  $U-PuO_2$  vegyes oxid (MOX). Így megvalósulhat az újrahasznosítás. Ameddig azonban erre termikus reaktorokban kerül sor, addig csak egyszeri újrahasznosításról beszélhetünk, mert az ismételt reprocesszálás értelmetlenné válik. Ennek az az oka, hogy termikus reaktorokban nagyon lényeges a plutónium izotóp-összetétele. A 239, 240, 241 és 242 tömegszámú plutónium-izotópok maghasadásra való hajlama erősen eltérő, és az összetétel a termikus reaktorokban való ismételt felhasználás során rohamosan kedvezőtlené válik.

Nem ez a helyzet gyorsreaktorokban, ahol a plutónium izotóp-összetétele gyakorlatilag változatlan marad. Ha a gyorsreaktorban az  $U-PuO_2$  üzemanyagot uránnal vesszük körül, akkor elérhető, hogy a gyorsreaktor üzeme során legalább annyi hasadóanyag keletkezzék, mint amennyit a reaktor az energiatermeléshez elfogyaszt (ez persze a veszteségek miatt nem perpetuum mobile). Tekintettel arra, hogy a világ uránkészletei végesek, és gazdaságos kitermelésük belátható időn belül (a mostani becslések szerint mintegy 250 év múlva) véget ér, az atomenergia hosszú távú használatához a gyorsreaktorok kifejlesztése és alkalmazása elengedhetetlen.

A gyorsreaktorok alkalmasak lesznek a transzurán izotópok elégetésére is. Összességében tehát a gyorsreaktorok (megfelelő reprocesszálási eljárás felhasználásával) lehetővé teszik az atomreaktorokban keletkező nagyaktivitású hulladék radikálisan gyorsabb lebomlását, egyszerűsítik az atomenergia fenntartható használatát.

### Hogy áll a gyorsreaktorok fejlesztése?

Joggal kérdezhető, hogy ha a gyorsreaktorok használata ilyen sok előnnyel jár, akkor miért nem kerültek már nagy számban üzembe. Ennek két oka van: a reaktor megvalósításának műszaki problémái és a reprocesszállással járó műszaki és biztonsági problémák. 2017. júniusában az oroszországi Jekatyerinburgban került sor a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség 3. gyorsreaktor-világkonferenciájára, ami jó alkalmat adott az aktuális helyzet értékelésére.

Az elmúlt évtizedekben megépült néhány gyorsreaktor. A Szovjetunióban (Kazahsztánban), Franciaországban és Japánban épült gyorsreaktorok működése eléggé dicstelenül ért véget, de Oroszország, India és Kína épített újabb gyorsreaktorokat. Mindezek a reaktorok (a szovjet atomtengeraltjárók reaktorait leszámítva) nátriumhűtésűek voltak. A nátriumhűtés két jelentős kockázattal jár. Az egyik az, hogy az erőműben végső soron gőzt kell fejleszteni, azaz szükségképpen van benne egy nátrium-víz hőcserélő, amelynek két közege még rendkívüli helyzetben sem érintkezhet egymással, mert bekövetkezik a nátriumtűz (a középiskolai kémiaórákon ez mindenki számára szemlélteték). A másik problémát az okozza, hogy a reaktorok ún. üregtényezője (azaz annak hatása a reaktor kritikuságára, ha a nátrium helyére levegő kerülne) pozitív, ami pozitív visszacsatolásra vezethet és biztonsági szempontból csak megfelelő egyéb hatások egyidejű fellépésének biztosítá-



sával engedhető meg. (Talán felesleges emlékeztetni arra, hogy hasonló probléma okozta a csernobili balesetet.) Az ólomhűtés termodinamikailag valamivel kedvezőtlenebb, de égésveszély nincs és az üregtényező is kedvezőbb (de pozitív), alapvetően azonban meghatározó a folyékony ólom erősen korrozív tulajdonsága. Elmondható, hogy a gyorsreaktorok fejlesztésének egyik kulcsa a megfelelő szerkezeti anyagok kikísérletezése (ugyanúgy, mint a szabályozott termionukleáris fűző esetében).

A gyorsreaktorokra vonatkozó kutatás-fejlesztés az atomenergetika fontos célkitűzése. Az atomerőművek eddigi három generációját (az üzemeltetésből már kivont első generációs reaktorokat, a viszonylag régebben épült, de ma is sikeresen működő második generációs reaktorokat, ahová a paksi atomerőmű működő blokkjai tartoznak, továbbá a jelenleg épülő harmadik generációs reaktorokat, pl. a leendő paksi blokkokat) az atomerőművek negyedik nemzedéke fogja követni. E negyedik generáció legfontosabb elemei lesznek a gyorsreaktorok.



2. ábra. A BN-800 rektorblokk képe

Ma Oroszország vezető szerepet játszik a gyorsreaktorok fejlesztésében: zavartalanul működik a BN-600 és BN-800 (2. ábra) nátriumhűtésű gyorsreaktoros atomerőművi blokk (a nevükben szereplő szám a reaktor villamos teljesítményét adja meg MW egységekben), és meg fog épülni a hasonló BN-1200, a későbbi széria első darabja is. Ugyancsak eldöntötték, hogy megépítik a BRESZT-300 ólomhűtésű gyorsreaktor prototípust, és foglalkoznak a korábban az atomtengeralattjárókban használt kb. 100 MW-os ólom-bizmut hűtésű gyorsreaktor alkalmazásával is a villamosenergia-hálózatától távoli területeken. Oroszország mel-

lett jelentős a fejlődés Indiában és Kínában, továbbá fejlesztések folynak Koreában, Japánban és Franciaországban. Feltűnő az Európai Unió elmaradása, ami az idő folyamán egyre nő, míg az Egyesült Államok hosszú évtizedek óta eleve távol tartja magát a gyorsreaktorok fejlesztésétől és a polgári célú reprocesszálástól.

A műszaki problémákon túl két tényező hátráltatja a gyorsreaktorok fejlesztését.

Az egyik a gáz- és olajárak jelenlegi alacsony szintje, amely az atomerőművek építését viszonylag gazdaságtalanná teszi, főképp az Egyesült Államokban. Nehéz megjósolni a 10-20-30 év múlva előálló gazdasági világhelyzetet, de a jelenlegi helyzet az atomenergetika szempontjából biztosan kedvezőtlen. Gyorsreaktorok építése további nagy anyagi kockázatot jelent, mint általában minden újdonságé, ráadásul reprocesszálás nélküli, pusztán energiatermelésre való használatuk bizonyosan gazdaságtalan lenne.

Ha feltételezzük, hogy sikerül kifejleszteni a reprocesszálás biztonságos módszerét, akkor is kérdéses, hogy hogyan lehetne optimalizálni a termikus- és gyors-

elem-gyárral, avagy a telepen mondjuk csak gyorsreaktorok, reprocesszáló berendezés és fűtőelem-gyár működjön és a kiégett és friss fűtőelemeket más telepekről/telepekre kelljen szállítani (figyelembe véve a szállítás biztonsági és gazdasági hatásait).

Mindezen problémák ellenére, tekintettel a gyorsreaktorokban rejlő hatalmas lehetőségekre, a fejlesztés bizonyosan folytatódik. Nem lenne szerencsés, ha Oroszország és az ázsiai hatalmak annyira előretörnének e téren, hogy Európa teljesen kimaradna a fejlesztés fő irányából.

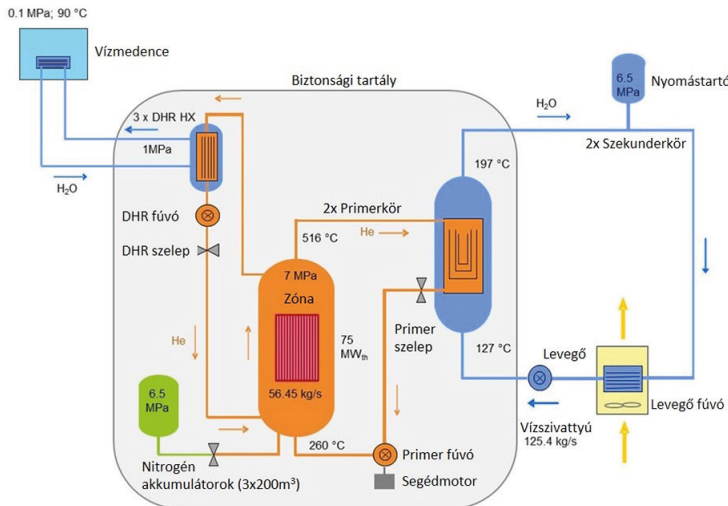
### A gázhűtésű gyorsreaktor és az ALLEGRO projekt keretei

Mint említettük, már a reaktorfejlesztés kezdeti szakaszában felmerült gáz hűtőközeg alkalmazása. Erre nyilvánosan sor is került: a Nagy-Britanniában alkalmazott, saját fejlesztésű termikus erőművi reaktorok jó része CO<sub>2</sub>-hűtésű. Annak idején fejlődésnek indult a magas hőmérsékletű héliumhűtésű reaktorok fejlesztése, elsősorban Németországban (ez manapság Kínában folytatódik) és Japánban. Egy gázhűtésű gyorsreaktor fejlesztését a franciák kezdeményezték. Több, itt nem részletezendő lépés után 2009-ben elkészült a francia CEA reaktor-konceptiója, amelyet azután a GoFastR elnevezésű európai projekt tovább finomított és így eljutottunk a ma referencia-konceptiónak nevezett elképzeléshez. E szerint a terv szerint megépíthető egy 2400 MW termikus teljesítményű héliumhűtésű gyorsreaktor, amelyet a villamosenergia termelése mellett magas hőmérsékletű (800-1000 °C) gáz előállítására is lehet majd használni. Várható a magas hőmérsékletű gáz kiterjedt ipari alkalmazása, pl. hidrogén-termelésre.

A létesítést azonban szokás szerint meg kell előznie egy ún. demonstrációs berendezés építésének, ami lehetővé teszi a technológia kipróbálását, valamint egy prototípus megépítésének, amelyen már gyakorlatilag üzemi körülmények között lehet majd igazolni a széria-blokkok biztonságos működését. A demonstrációs reaktort nevezzük ALLEGRO-nak.

Az ALLEGRO reaktor megépítése három célt szolgál:

- a gázhűtésű gyorsreaktor koncepció megvalósíthatóságának igazolását,
- a majdani gyorsreaktorokban alkalmazandó fűtőelemek működőképességének igazolását,
- a magas hőmérséklet eléréséhez és fenntartásához szükséges anyagok és technológia üzemszerű kipróbálását.



3. ábra. Az ALLEGRO reaktor működési sémája

2008-ban a CEA kezdeményezte, hogy a visegrádi országok kutatóintézetei vegyék kezükbe az ALLEGRO fejlesztését, mivel Franciaország kapacitásait leköti az ASTRID nátriumhűtésű gyorsreaktor és az ITER fejlesztése. Ennek nyomán az MTA Atomenergia Kutatóintézet (a mai MTA Energiatudományi Kutatóközpont jogelődje), a cseh ÚJV Řež a.s. és a szlovák VUJE a.s. vezetői szándéknyilatkozatot írtak alá az ALLEGRO fejlesztésének előkészítését célzó együttműködésről, amelyet a CEA tudásával támogat. A megállapodáshoz 2012-ben a lengyel NCBJ is csatlakozott. 2013-ban a négy kutatóintézet létrehozta a V4G4 Centre of Excellence Szlovákiában bejegyzett egyesülést, amelyhez a CEA társult tagként csatlakozott (V4G4: Visegrád 4 countries for Generation 4 reactors). Az előkészítő szakasz után 2015-ben elindult az ALLEGRO projekt első fázisa, amelynek célja az ALLEGRO reaktor koncepciótervének kidolgozása 2025-ig egy meghatározott Újterv alapján. A munkába a V4G4 tagjain kívül a kutatóintézetek szakmai partnerei (így Magyarországon a NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft. és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete) is bekapcsolódtak. A magyar részvétel finanszírozása (2018-ig) a NKFIH által támogatott Nemzeti Nukleáris Kutatási Program keretében történik.

Amennyiben az ALLEGRO projekt első fázisa igazolja a reaktor megvalósíthatóságát, akkor 2025 után megkezdődhet a második fázis, amelynek során elkészül a reaktor műszaki és kivitelezési terve, megtörténik a reaktor építése és üzembe helyezése, végül 2035 körül elkezdődhet az üzemeltetés. A reaktor várhatóan Szlovákiában, a bohunicei (Apátszentmihály) atom-

erőmű területén épül majd meg. A második fázis mindegyik eleme természetesen csak az illetékes nukleáris biztonsági hatóság vonatkozó engedélyének birtokában kezdődhet meg. A második fázisban működő konzorciumban a kutatóintézetek már kisebb szerepet fognak játszani, a meghatározóak a tervező-kivitelező ipari cég és a majdani üzemeltető cég lesznek.

### Az ALLEGRO projekt helyzete

Az ALLEGRO projekt előkészítő szakasza megállapította, hogy a referencia koncepció sok tekintetben elégtelen, ezért új koncepció kidolgozására van szükség. A 3. ábra mutatja az ALLEGRO reaktor referencia-koncepciójának megfelelő működési sémát.

E koncepció meghaladása a következő elemeket fogja tartalmazni.

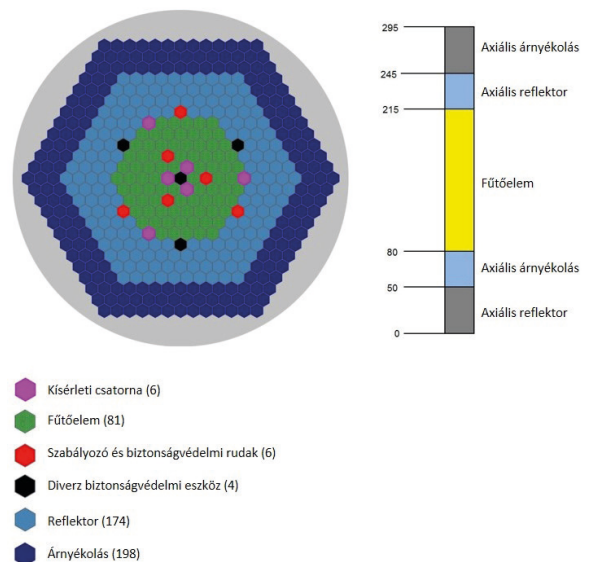
A reaktort első lépésben már kipróbált fűtőelemekből kell felépíteni (4. ábra). Ezek acél burkolatú  $UO_2$  vagy MOX tablettákból álló pálcák. Ebben a reaktorban kell tesztelni a perspektivikus fűtőelemeket, amelyek burkolata SiC szálerősítésű SiC kompozit anyag, a tabletták pedig urán és plutónium tartalmú karbidból (UPuC) készülnek. A reaktor teljesítményét úgy kell

megválasztani, hogy a reaktor biztonságosan működtethető legyen az első lépésben is, ezért a reaktort a második lépésre tervezett 75 termikus MW helyett kisebb, most meghatározandó teljesítményen kell majd működtetni úgy, hogy a perspektivikus fűtőelemek besugárzását elegendően rövid idő alatt el lehessen végezni.

Gyakorlatilag ki kell zárnunk annak lehetőségét, hogy szükség esetén a szabályozó- és biztonságvédelmi abszorbensrudak ne essenek be a reaktorzónába, ezért a már most is kis valószínűségű esemény teljes kizárása érdekében alapvető természettörvények alapján automatikusan működő ún. diverz biztonságvédelmi eszközöket is ki kell fejleszteni.

A reaktor primerkörében (5. ábra) mindenképpen biztosítani kell, hogy a kényszeráramlás megszűnése esetén mihamarabb meginduljon a természetes cirkuláció. Ebből a célból valószínűleg nitrogént kell befeleskendezni a rendszerbe, aminek részleteit ki kell dolgozni.

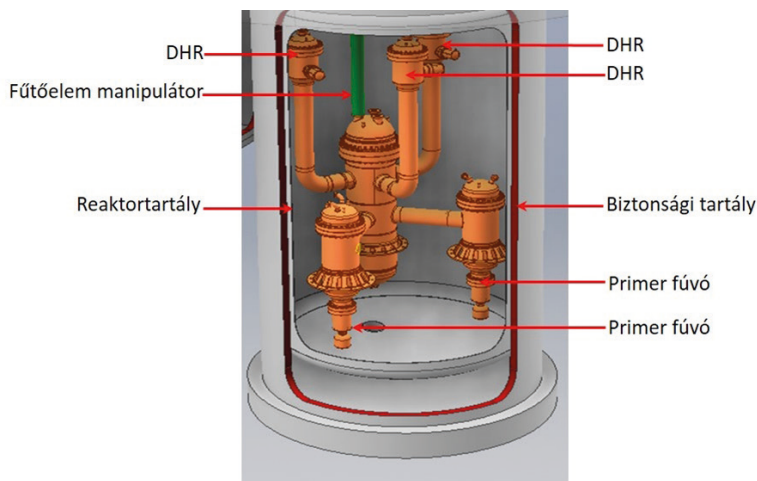
A reaktor leállítását követően működésbe kell lépnie az ún. maradványhő-eltávolító rendszernek (DHR), hiszen a reaktorban a láncreakció leállítását követően is termelődik hő a radioaktív bomlások miatt. A referencia-koncepció aktív, azaz a reaktort működtető operátorok beavatkozásával, valamint villamos betáplálást igénylő áttéréssel számol, de mindenképpen ki kell dolgozni a passzív áttérés mikéntjét.



4. ábra. Az ALLEGRO reaktor aktív zónája

A referencia-koncepció hélium-víz hőcserélőt és vízzel feltöltött szekunderkört irányoz elő. Ezt el kell kerülni, részben a kritikuság szempontjából kockázatos vízbetörés kiküszöbölése céljából, részben azért, mert az alkalmazandó turbógenerátor





5. ábra. Az ALLEGRO felépítése

toros megoldás lehetővé teszi a primerköri kényszeráramoltatás csökkenő mértékű folytatását a reaktor leállítása után is.

A reaktor primerkörét körülvevő speciális biztonsági tartály feladata, hogy a primerköri hélium hűtőközeg elvesztése ellenére a nyomás olyan magas maradjon, hogy a kényszeráramoltatás folytatható legyen. A speciális biztonsági tartály ipariilag lehetséges legmagasabb nyomását meg kell határozni.

A reaktorban a zóna olvadását gyakorlatilag ki kell zárni. A reaktort olyan konténmenttel és zónaolvadékot felfogó rendszerrel kell ellátni, hogy még súlyos baleset bekövetkezése esetén se legyen szükség a reaktor 800 méteres körzetén kívül semmiféle rendkívüli egészségügyi intézkedésre.

Amint látható, a feladatok sora nem rövid, és ezek csak a koncepció átdolgozásával kapcsolatos feladatok. Ezekén túlme-

nően természetesen intenzíven kell foglalkozni olyan eleve ismert kérdésekkel, mint a hélium visszatartása vagy speciális mérőrendszer kidolgozása (ami a gáz átlátszósága miatt teljesen újszerű technikák bevezetését vetíti előre).

2018 végén látni fogjuk, hogy a fenti feladatok megvalósíthatóak-e, és pozitív esetben megkezdődhet a koncepció részleteinek kidolgozása. ▣

## Irodalom

Az alábbi szakirodalmakból bővebb tájékoztatás nyerhető az egyes témákról.

Gyorsreaktorok: Status of Fast Reactor Research and Technology Development, IAEA-TECDOC-CD-1691, IAEA, Vienna, 2013

4. generációs atomreaktorok fejlesztése: Generation IV Nuclear Reactors, [www.world-nuclear-org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx](http://www.world-nuclear-org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx)

Reprocesszálás: Spent Fuel Reprocessing Options, IAEA-TECDOC-1587, 2008

Becsült uránkészletek: Uranium 2016: Resources, Production and Demand, OECD 2016 NEA No. 7301 (<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>)

FR17 konferencia: Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Ekaterinburg, 25-29 June, 2017, IAEA, Vienna

HÓZER ZOLTÁN

# Atomerőművi fűtőelemek

Az első atommérnök, Wigner Jenő terveit megalapozták az atomenergetika fejlődését. A ma működő atomerőművek a közel hetven évvel ezelőtt lefektetett elveken üzemelnek, műszaki megoldásaik azonban jelentősen eltérnek az első reaktorokétól. Az atomerőmű egyik legfontosabb eleme a fűtőelem. Az alábbi írásban ennek jellemzőiről lesz szó néhány hazai kutatási eredménnyel illusztrálva.

## Az atomerőművek üzemanyaga

Az atomerőművek reaktoraiban a maghasadások a fűtőelemekben mennek végbe. A fűtőelemek konstrukciója viszonylag egyszerű: az urán-dioxid tablettákat tartalmazó cirkónium csöveket záródugók-

kal hermetikusan lezárják és a tablettaszlop hőtágulását egy rugóval kompenzálják (1. ábra).

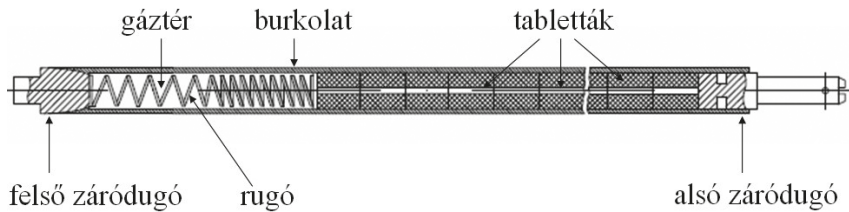
Az urán-dioxidot – azon túl, hogy megfelelő mennyiségű hasadóanyagot tartalmaz – számos egyéb tulajdonsága is alkalmazható arra, hogy több évig üzemeljen a reaktorban. Az  $\text{UO}_2$  megőrzi geometriai méreteit, a hőmérséklet és a besugárzás csak kismértékű változásokat okoz a tablettá formájában és nagyságában. Hőtani jellemzői megakadályozzák, hogy üzemeltetés közben az üzemanyag megolvadjon, kémiaiailag összeférhető a burkolatanyaggal és a hűtőközeggel.

Az atomerőművi fűtőelemek burkolatát elsősorban azért készítik cirkónium-ötvözetből, mert a cirkónium kis neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkezik, azaz gyakorlatilag átlátszó

a neutronok számára. További előnyös tulajdonsága, hogy nem lép intenzív kémiai kölcsönhatásba a tablettával és jó korrózióállóság jellemzi vizes közegben. A cirkónium-ötvözeteknek megfelelő sugárállóságuk és a rozsdamentes acélokhoz hasonló mechanikai szilárdságuk van.

A fémcirkónium korrózió- és sugárállósága, valamint mechanikai tulajdonságai ötvöző elemek hozzáadásával optimalizálhatóak a reaktorokra jellemző körülményekre. A néhány tized, vagy 1–2%-ban hozzáadott ötvözők jelentősen ronthatják a fűtőelem reaktorfizikai tulajdonságait, ezért elsősorban olyan elemeket használnak ötvözőként, amelyeknek kicsi a neutronbefogási hatáskeresztmetszetük.

A nagy teljesítményen üzemelő atomerőművi reaktorokban több tízezer fűtőelem alkotja az aktív zónát. A fűtő-



1. ábra. VVER-440 típusú fűtőelem

elem-pálcákat nem egyesével rakják be a reaktorba, hanem kazettákat szerelnek össze belőlük, amelyeket az erőművi átrakógép önállóan tud mozgatni. A jelenlegi VVER-440 típusú paksi blokkokon egy kazetta 126 fűtőelemet tartalmaz. Az újabb blokkok VVER-1200 reaktorainak kazettáiban pedig 312 fűtőelemmel számolnak. A kazetták szerkezeti elemei biztosítják azt is, hogy fűtőelemek közötti távolság a terveknek megfelelően állandó legyen (2. ábra).

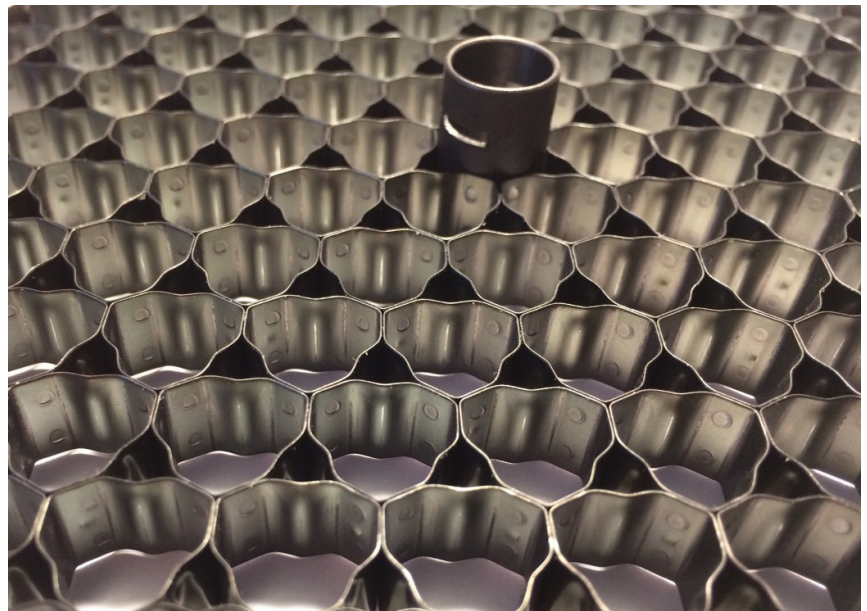
### Az üzemelés során fellépő változások

A fűtőelemek több évet töltenek a reaktorban nagyon komoly terhelés alatt. A maghasadás során keletkező nagyenergiájú hasadási termékek és neutronok szerkezeti változásokat okoznak a tablettákban és burkolatban. A magas hőmérséklet és nyomás pedig hőtechnikai és mechanikai igénybevételt jelent.

Az urán- és plutóniumatomok hasadásakor különböző kémiai tulajdonságokkal rendelkező hasadási termékek jelennek meg az üzemanyagban. Néhány elem (Nd, Ce, Eu) oldódik a mátrixban és elfoglalja az elhasadt uránatom helyét a kristályrácsban. A nemesgázok (Xe, Kr) gázbuborékokat képeznek. A Ba, Sr, Zr oxidzárványokat hoz létre, a nemesfémekből (Ru, Pd, Tc, Rh) pedig fémes zárványok jönnek létre. Az  $^{238}\text{U}$  izotópból neutronbefogással plutónium és további aktinidák (Np, Am, Cm) keletkeznek, a tablettá szélén egy plutóniumban gazdag peremréteg alakul ki. A hasadóképes  $^{239}\text{Pu}$  megjelenése miatt a tablettá peremrétegében megnő a hasadások száma, a hasadási termékek mennyisége. Az összetétel változása és az eredetileg homogén, szemcsés mikroszerkezet átalakulása a tablettá duzzadásához és hővezetésének romlásához vezet.

A burkolat átmérője a besugárzás és a magas hűtőközeg oldali nyomás hatására csökken, ezzel együtt a pálcá hossza növekszik. A tervezéskor a kazettákban szabad térfiguratot hagynak a pálcák fölött, hogy ez a méretnövekedés ne okozzon olyan feszültségeket, amelyek a fűtőelem integritását veszélyeztetnék. Annak elle-

nére, hogy az erőművekben nagy gondot fordítanak a hűtőközeg tisztaságának megőrzésére, a több éves üzemelés alatt a cirkónium burkolaton oxidréteg jön létre és a radiolízis, illetve a korróziós folyamatok során keletkező hidrogén egy része is beépülhet burkolatba. A burkolat így veszíthet képlékenységből és bizonyos mértékben elridegedhet, kisebb terhelést tud elviselni. A cirkóniumötvözetek korrózióállósága jól javítható bizonyos ötvözőe-



2. ábra. A VVER-440 típusú kazetta távtartórácsa

lemekkel, például a nióbbiummal, ezért a paksi blokkokon is nióbbiummal ötvözött cirkóniumot használnak.

A burkolatban és a tablettában végbe-menő változások hatással vannak a fűtőelem pálcá egészének állapotára is. A tablettá duzzadása és a burkolat kúszása miatt a tablettá és a burkolat felülete között mechanikai és kémiai kölcsönhatások léphetnek fel. A hasadási gázok felhalmozódása pedig növeli a fűtőelem belsejében a gáznyomást. Ezekkel a folyamatokkal már az üzemanyag tervezésekor is számolni lehet. A fűtőelemeket úgy tervezik meg és a reaktor üzemelését is úgy alakítják ki, vagy szükség esetén úgy korlátozzák, hogy a

belső gáznyomás vagy a tablettá és a burkolat közötti kontaktus se vezethessen a fűtőelemek sérüléséhez.

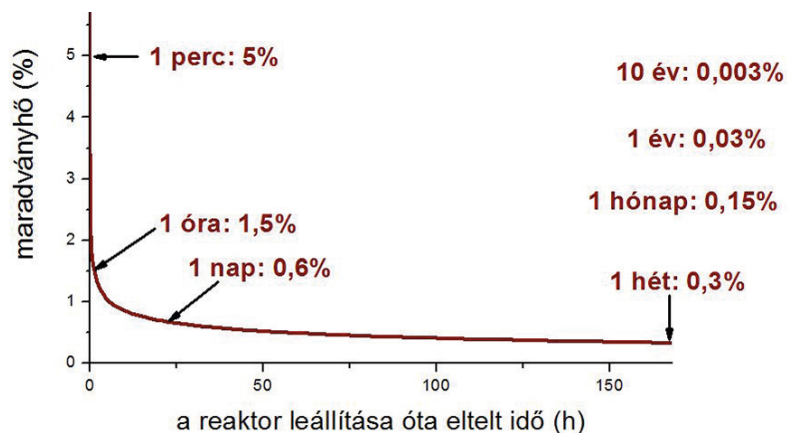
### A kiégett üzemanyag tárolása

A reaktorban eltöltött évek alatt az üzemanyag összetételének változása – a hasadóanyag-tartalom csökkenése és a reaktor üzemelés szempontjából kedvezőtlen tulajdonságú hasadási termékek felhalmozódása – miatt a kazettát nem lehet tovább használni, a reaktor leállítása után friss üzemanyagra kell kicserélni. A reaktorból eltávolított, kiégett kazettában jelentős mennyiségű radioaktív hasadási termék van, ezért az üzemanyagban folyamatosan radioaktív bomlások mennek végbe. Vannak nagyon hosszú felezési idejű izotópok a hasadási termékek és az aktinidák között, ezért a kiégett kazetta sugárzásával hosszú távon számolni kell. A sugár-

zás ellen megfelelő árnyékolással lehet és kell védekezni. Ezért a kazetták tárolására használt pihentető medencében magas vízszintet tartanak a kazetták fölött és a medencét vastag betonfal alkotja. A kiégett üzemanyag hasadóanyag tartalma miatt a tárolókat úgy kell kialakítani, hogy semmilyen körülmények között ne alakulhasson ki kritikus állapot, azaz ne indulhasson be a láncreakció.

A radioaktív bomlás a kiégett kazettákban hőfejlődéssel jár, ez az úgy nevezett maradványhő. A kazetták teljesítménye a reaktor leállása után kezdetben gyorsan csökken, 1 órával a leállást követően csak az eredeti teljesítmény 1,5%-ával kell szá-





3. ábra. Maradványhő a kiégett üzemanyagban

molni (3. ábra). A következő időszakban azonban lassul ez a tendencia és egy héttel a leállítás után még 0,3%, majd egy évvel később még 0,03% hőteljesítmény elvételéről kell gondoskodni. Ez a paksi kazetták esetében egy év után még több mint 1 kW hőfejlődést jelent.

A kazetták hűtéséről hosszú időn keresztül gondoskodni kell. A reaktorból eltávolított üzemanyagot először a reaktor közvetlen közelében található pihentető medencében helyezik el, ahol több évig tárolják. A pihentető medence vizét egy önálló hűtőkör tartja állandó hőmérsékleten.

Néhány év tárolás után a kazetták teljesítménye pár száz wattal csökken és akkor már át lehet őket szállítani a kiégett kazetták átmeneti tárolójában. Ez a tároló az atomerőmű közvetlen szomszédságában található. Minden kazettát külön-külön függőleges tárolócsövekben helyeznek el, amelyek nitrogénnel vannak feltöltve. A nitrogén atmoszférával elkerülhető az üzemanyag oxidációja. A hatalmas kamrákba beépített függőleges csöveket kívülről levegő hűti, ami az épület folyosóin és kéményein keresztül, természetes cirkulációval viszi el a maradványhőt a kazettákból. Az átmeneti tárolót több évtizedes üzemelésre tervezték.

A kazettákban a radioaktív bomlások miatt egyre csökken a radioaktív izotópok mennyisége és ezzel párhuzamosan a maradványhő is. A kiégett üzemanyag – amennyiben a benne lévő hasadóanyag hasznosítása céljából nem kerül újrafeldolgozásra – végleges elhelyezésre kerülhet a mélygeológiai tárolóban. Ilyen tároló hazánkban egyelőre nem üzemel, az első mélygeológiai tárolókat néhány éven belül Finnországban és Svédországban kezdik meg kiégett üzemanyaggal feltölteni.

### Üzemzavarok és balesetek

Az atomerőművek üzemanyagát úgy tervezik meg, hogy az előzőekben leírt életút (több év reaktorban töltött idő, átmeneti tárolás a pihentető medencében és a száraz tárolóban) során várható terheléseket nagy biztonsággal elviselje, és ne jöjjenek benne létre olyan változások, amelyek a fűtőelemek épségét veszélyeztetve radioaktív kibocsátásokhoz vezethessenek. A normál üzemi állapotokon túl a fűtőelemek tervezésekor figyelembe kell venni azokat az üzemzavari állapotokat is, amelyek ha csak kis valószínűséggel is, de bekövetkezhetnek az erőműben.

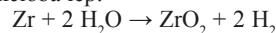
A csernobili és fukusimai balesetek példája azt mutatta, hogy nem zárható ki teljesen olyan balesetek bekövetkezése sem, amelyek a fűtőelemek sérülésé-

a maradványhő elvitelét folyamatosan biztosítani kell. Ha a hőelvitel nem megfelelő mértékű, akkor a fűtőelemek felmelegednek és különböző fizikai és kémiai folyamatok a pálcák épségének elvesztéséhez vezethetnek. A következő részben röviden áttekintjük ezeket a folyamatokat.

A hűtés nélkül maradt aktív zónába a felhevült cirkónium burkolat jelentősen veszít mechanikai szilárdságából, csökken az ötvözet folyáshatára és a hasadási gázok okozta magas belső nyomás hatására deformáció jöhet létre. A felfűvódott burkolat fala elvékonyodik és fel is hasadhat (4. ábra). A kazettában a fűtőlempálcák között csak néhány mm távolság van, ezért a burkolatok felfűvódása részben elzárhatja azt a szabad keresztmetszetet, ahol hűtőközeg áramlik.

Magas hőmérsékleten megváltozik a cirkónium ötvözetek kristályszerkezete is. Az eredetileg hexagonális szoros illeszkedésű  $\alpha$ -fázisból 600–900 °C között térfokozepes köbös  $\beta$ -fázis jön létre, amit a mechanikai tulajdonságok változása kísér.

A normál üzemelés során, vizes közegben nagyon jó korrózióállóságú cirkónium magas hőmérsékletű vízgőzzel intenzív reakcióba lép:



Az exoterm reakcióban 1 kg cirkónium oxidációja során 6,4 MJ energia szabadul fel. 1200 °C fölötti hőmérsékleteken az intenzív kémiai reakció gyors hőmérsékletmegszaladást okozhat.

Az oxidáció során a fém felületén oxidréteg képződik, továbbá az elnyelt oxigén egy része bediffundál az oxidréteg alatti fémbe. Így az oxidréteg alatt egy oxigéndús  $\alpha$ -réteg alakul ki, a burkolat



4. ábra. 800 °C-os hőmérsékleten végrehajtott kísérletben felhasadt cirkónium burkolat

vel, vagy a zóna megolvadásával járnak. Ezekben a baleseti állapotokban a radioaktív anyagok környezeti kikerülését úgy lehet megakadályozni, hogy megfelelő méretezéssel és műszaki megoldásokkal megőrzik az erőmű további védelmi gátjainak – elsősorban a reaktortartályt is magában foglaló konténment épületnek – az épségét.

Az üzemzavarok és balesetek elején az atomerőmű biztonságvédelmi rendszerei – a jellemző paraméterek nem megengedhető mértékű változása miatt – működésben lépnek és leállítják a láncreakciót. A reaktor teljesítménye gyorsan csökken, de

belsejében pedig egy alacsony oxigéntartalmú  $\beta$  réteg marad. Az oxidáció során keletkező hidrogén egy részét ugyancsak elnyeli a fém, a hidrogén elsősorban a belső  $\beta$  rétegben halmozódik fel. A felületen általában zárt oxidréteg képződik, de egyes ötvözeteken bizonyos hőmérsékleti tartományokban leváló oxidrétegek jönnek létre. Minden egyes réteg leválása után szabad fém felülettel érintkezhet a gőz, ez felgyorsítja a reakciót és megkönnyíti a hidrogén bejutását a fémbe.

A cirkónium ötvözet összetételének és szerkezetének említett változásai jelentősen csökkentik a burkolat képlékeny-

ségét. Az oxidáció és a hidrogénfelvétellel mértékének növekedése olyan rideg állapothoz vezethet, amikor a burkolat teherbíróképessége már nem tudja elviselni az üzemzavar során fellépő terheléseket (5. ábra). Az egyik legnagyobb terhelés, amivel ilyen esetekben számolni kell, a vészhűtőrendszerből beáramló nagy tömegű hidegvíz, ami egyszerre okoz termikus és mechanikai feszültségeket.

A burkolat sérülése után kikerülnek a fűtőelemből a tabletták és a burkolat közötti részben a normál üzemelés során felhalmozódott hasadási termékek. A további felmelegedés következtében a tabletták repedezésével és később olvadásával a radioaktív izotópok kibocsátása folytatódik. A nemesgázok (Xe, Kr) és a magas hőmérsékleteken illékony hasadási termékek (I, Cs, Ag, Cd, Sb, Sn, Te, Rb) kikerülése folyamatosan nő a hőmérséklet emelkedésével. A kevésbé illékony elemekből (Ba, In, Mo, Tc, Ce, Eu, La, Nb, Ru, Sr, Y) kisebb mértékű kikerülés várható.

Súlyos balesetekben a felmelegedés a zóna megolvadásához vezethet. Nagyon fontos paraméter a zóna felmelegedésének sebessége, amely részben a zóna maradványhőjétől, részben pedig a zónába kerülő hűtőközeg mennyiségétől függ. Ha ez az érték  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , akkor a szárazon maradt zóna megolvadásához félóra is elegendő, míg  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  sebességnél több mint két óra is eltelik az olvadásig.



5. ábra. Ridegtörést szenvedett, oxidált, kísérleti fűtőelemköteg

Az aktív zóna szerkezeti elemei közül az acélok rendelkeznek a legalacsonyabb olvadásponttal, ezért  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  elérése után a kazetták bizonyos részegységei, valamint a szabályozó rudak burkolata fog először megolvadni. A nem oxidálódott cirkónium ötvözetek olvadásáa  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  fölött kezdődik meg. Az olvad

cirkónium oldja az urán-dioxidot, továbbá kémiai reakció során cirkónium-dioxid és fém urán képződhet. Az  $\text{UO}_2$  tabletták olvadásáa  $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül lép fel. A fűtőelemek megolvadása miatt természetesen már nem lehet számolni az eredeti, hűthető kazetta geometriával. A zóna átrendeződik, a sérült fűtőelemdarabok, olvadékok a gravitáció hatására lefelé indulnak és a reaktortartály alján olvadékmedence jöhet létre.


A vastag falú reaktortartály és az olvadékmedence kölcsönhatása idővel elvezethet a tartályfal olyan mértékű elvékonyodásához, amikor a tartály alja leszakad. A tartály sérülése elkerülhető, ha a reaktor külső felületét hűtik és elviszik az olvadékmedence maradványhőjét. Ilyen megoldást dolgoztak ki a paksi atomerőműben is, ahol szükség esetén a tartálynak helyet adó reaktorakna vízzel elárasztható. A felmelegedett víz természetes cirkulációval viszi el a hőt és hűti a tartályt. A tartály külső hűtése csak kisteljesítményű reaktorokra alkalmazható, ezért az új paksi blokkokra más megoldást kellett kifejleszteni.



6. ábra. Kísérleti fűtőelemköteg metszete légbetöréses baleset szimulációja után

dék a tartályfalra kisebb hőfluxussal adja át a maradványhőt, ezért hűtése egyszerűbb.

A tartály sérülése után levegő juthat a reaktorba. Ha csak a zóna közepe olvadt meg, a zóna szélén lévő kazetták pedig helyükön maradtak, akkor a beáramló levegő intenzív kölcsönhatásba léphet a fűtőelemekkel. A cirkónium levegőben még intenzívebben oxidálódik és az oxidok mellett nitridek is képződnek (6. ábra). A hőmérséklet megszaladás ilyen körülmények között gyorsabb, mint vízgőzben. A hasadási termékek közül a ruténium levegőn oxidálódik és gáznemű oxidok képződnek, amelyek könnyebben kijuthatnak környezetbe.

A felsorolt folyamatok jól illusztrálják, hogy milyen komplex folyamatok mehetnek végbe az atomerőművi fűtőelemekkel. Az első reaktorokban – amelyek tervezésében Wigner Jenőnek komoly szerepe volt – a sokkal kisebb teljesítmény miatt ezekkel a jelenségekkel még nem kellett számolni, ugyanakkor számos alapvető problémát meg kellett oldani, és ezek a megoldások azóta is a fontosak az újabb reaktorok tervezéséhez, üzemeltetéséhez. 

## Irodalom

- B.R. Sehgal: Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology, Academic Press 2012.
- Csom Gy.: Atomerőművek üzemtana, II. kötet, Az energetikai atomreaktorok üzemtana, 4. rész, 2012.
- Elter J., Gadó J., Holló E., Lux I.: Atomreaktorok biztonsága I., ELTE Eötvös kiadó, 2013.
- Hózer Z.: Az új paksi reaktorok üzemanyaga, Fizikai Szemle, 2015. december, 417-419



# Démoni kónikus kereszteződések

A molekuladinamikai folyamatok kvantummechanikai leírására a fizika és a kémia egyik leggyakrabban használt közelítési módszere az 1927-ben kidolgozott Born-Oppenheimer (BO) [1], vagy más néven adiabatikus közelítés, amely az elektronok és a jóval nehezebb atommagok mozgásának szétválasztásán alapul. Ebben a közelítésben a teljes dinamikai leírás két részből áll: az elektronok mozgására felírt Schrödinger-egyenlet sajátérték problémájának rögzített atommagoknál történő számításából, valamint az így meghatározott elektron-energiaszintek (potenciális energia felületek, PES) felhasználásával a magok dinamikai Schrödinger-egyenletének megoldásából. Bár a BO közelítés gyakran elegendő pontosságú a molekuláris sajátságok és folyamatok kívánt szintű megértéséhez, a jelenségek egy lényeges csoportja mégsem írható le egyetlen elektronikus energia felület figyelembevételével. Az adiabatikus közelítésben elhanyagolt ún. nemadiabatikus csatolás egyre jelentősebbé válik, amint két (vagy több) elektronállapot energiája megközelíti egymást. Ha pedig ezen elektronállapotok azonos energiával rendelkeznek, azaz degeneráltak a konfigurációs tér valamely részében, akkor ezek a csatolások szingulárisak. Ilyen esetekben olyan nemadiabatikus jelenségek lépnek fel az érintett elektronállapotok között, melyek nem írhatóak le megfelelő módon a BO közelítésben. Nagyon sok olyan biológiai, fizikai, kémiai folyamat játszódik le a természetben, pl. fotokémiai, fotobiológiai folyamatok, fotoszintézis, többatomos molekulák izomerizációs folyamatai (pl. maga a látás), de idetartozik a molekuláris elektronika, molekuláris kapcsolók működése is, stb., amikor egy molekuláris rendszerben degenerált állapotok (ún. „kónikus kereszteződések”) jelennek meg [2].

## Mik is azok a kónikus kereszteződések?

Az elektron-energiaszintek között kialakuló kónikus kereszteződések kulcsfontosságú szerepet játszanak a nemadiabatikus molekuláris folyamatokban. Ilyenkor a mag- és az elektronmozgás csatolódik, amelynek következményeként az energiacserelődés az elektronok és magok között igen jelentőssé válhat. Kónikus kereszteződések különböző elektronállapotok között már háromatomos molekuláknál is megjelenhetnek. Előfordulásuk azonban lényegében elkerülhetetlen, és jelen-

legi ismereteink szerint szinte mindenütt jelen vannak többatomos molekuláris rendszerekben. A kónikus kereszteződések közelében a különböző elektronállapotok között fellépő nemadiabatikus csatolási tagok értékei nagyon nagyok, és szingularitásuk van a kónikus kereszteződések helyén. Ennek a következménye, hogy a nemadiabatikus molekuladinamikai folyamatokban a kónikus kereszteződések keresztlátásodnak le a nagyon gyors átmenetek, hiszen ezeken a helyeken kerül egymáshoz a lehető „legközelebb” a két potenciálfelület. Más szavakkal, a „gyorsan lejátszódó” dinamikai folyamatok mindig kónikus kereszteződések keresztlátásodnak le a nagyon gyors átmenetek, hiszen ezeken a helyeken kerül egymáshoz a lehető „legközelebb” a két potenciálfelület. Más szavakkal, a „gyorsan lejátszódó” dinamikai folyamatok mindig kónikus kereszteződések keresztlátásodnak le a nagyon gyors átmenetek, hiszen ezeken a helyeken kerül egymáshoz a lehető „legközelebb” a két potenciálfelület.

Ismert, hogy kétatomos molekulákban, hacsak a szimmetria lehetővé nem teszi, kónikus kereszteződés soha nem alakul ki. Ez az ún. „noncrossing rule”, amelynek matematikai bizonyítását Neuman János és Wigner Jenő adta meg 1929-ben [3]. Az alábbiakban összefoglaljuk a bizonyítást. Induljunk ki egy kétatomos molekula elektron Hamilton-operátorából, amely diabatikus reprezentációban az alábbi alakú:

$$\hat{H}_{el} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12}^* & H_{22} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Az  $S$  unitér mátrix segítségével a  $H^{el}$  mátrix diagonális alakba transzformálható, amelyből megkaphatók az adiabatikus energiafelületek:

$$V_{\pm} = S^{\dagger} H^{el} S = \sum \pm \sqrt{\Delta^2 + H_{12}^2} \quad (2)$$

ahol

$$\Sigma = \frac{1}{2} (H_{11} + H_{22}) \text{ és } \Delta = \frac{1}{2} (H_{22} - H_{11}).$$

Fejtsük Taylor-sorba a  $\hat{H}$  diabatikus potenciális energiát egy  $R_0$  pont körül. Ez a pont lehet a molekula egyensúlyi geometriája, vagy a degenerancia helye is. Ekkor azt kapjuk, hogy

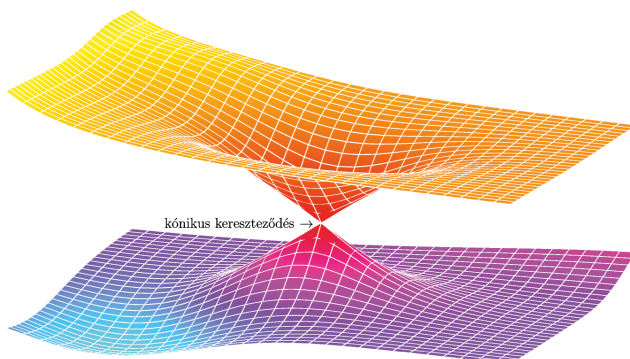
$$\hat{H}_{el}(R) = \hat{H}_{el}^{(0)} + \hat{H}_{el}^{(1)}(R) + \hat{H}_{el}^{(2)}(R) + \dots \quad (3)$$

A  $\hat{H}_{el}^{(0)}$  nulladrendű mátrix diagonális és értéke megegyezően választható az  $R_0$  pontban lévő adiabatikus potenciális energia értékével:

$$\hat{H}_{el}^{(0)} = \hat{V}(R_0). \quad (4)$$

Amennyiben a konfigurációs térnek csak egy számunkra releváns, de kis méretű részére terjesztjük ki a vizsgálatainkat, akkor a  $\hat{H}_{el}$  operátort a sorfejtése első két tagjával közelíthetjük, vagyis lineáris közelítéssel élünk. Az elsőrendű mátrixelem az alábbi alakban adható meg az adiabatikus elektron hullámfüggvények segítségével:

$$\hat{H}_{el}^{(1)} = \left[ \left\langle \Phi_1 \left| \frac{\partial \hat{H}_{el}}{\partial R} \right| \Phi_2 \right\rangle \right] R, \quad (5)$$

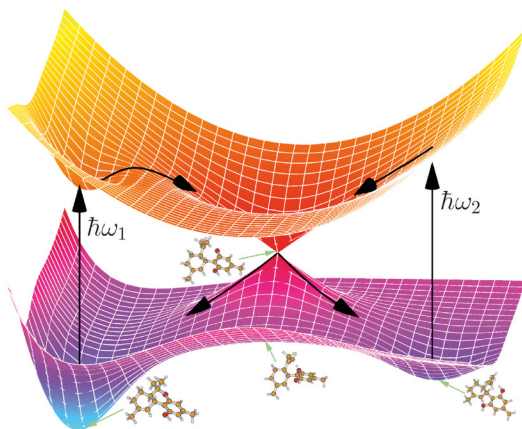


1. ábra. Kónikus kereszteződés az alap és gerjesztett elektronállapotok között

itt  $R$  az  $R_0$ -hoz viszonyított elmozdulást jelenti. Az elmozdulások együtthatóit a  $\hat{H}_{el}^{(1)}$  mátrix átlós elemeinél adiabatikus erőknél —  $\kappa^{(n)} \equiv \langle \Phi_n | \frac{\partial \hat{H}_{el}}{\partial R} | \Phi_n \rangle$  —, míg a nemdiagonális elemeknél nemadiabatikus csatolásoknak szokták nevezni. Mivel  $\hat{H}_{el}^{(1)}$  lineáris függvénye  $R$ -nek, szokás az elemeket az alábbi módon felírni:  $H_{11}^{(1)} = \kappa^{(1)} R$ ,  $H_{22}^{(1)} = \kappa^{(2)} R$  és  $H_{12}^{(1)} = \lambda \cdot R$ , ahol  $\lambda$  a lineáris csatolási együttható ( $\lambda \equiv \langle \Phi_1 | \frac{\partial \hat{H}_{el}}{\partial R} | \Phi_2 \rangle$ ). A modell rendszer adiabatikus potenciáljában a diszkriminánsban szereplő  $\Delta$  mennyiség pedig kifejezhető a  $\delta \equiv \frac{1}{2} (\kappa^{(2)} - \kappa^{(1)})$  ún. „gradiens különbség” vektorral:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{1}{2} (H_{22}^{(0)} + H_{11}^{(1)} - H_{11}^{(0)} - H_{11}^{(1)}) = \\ &= \frac{1}{2} (H_{22}^{(0)} - H_{11}^{(0)}) + \delta \cdot R. \end{aligned}$$

Ezután definiálható egy kétdimenziós, ún. „elágazási tér” („branching space”), amelynek  $\vec{e}_1$  és  $\vec{e}_2$  bázisvektorai párhuzamosak a gradiens különbség és lineáris csatolási vektorokkal. Térjünk vissza most a  $V_{\pm} = \sum \pm \sqrt{\Delta^2 + H_{12}^2}$  kifejezéshez, és tekintsük  $R_0$ -t a degenerancia helyének ( $H_{22}^{(0)} = H_{11}^{(0)}$ ). Ekkor teljesülnie kell, hogy  $V_+ = V_-$ , azaz



**2. ábra.** Sematikus kétdimenziós metszet a THC (tetrahidrokannabinol) molekula alap és első gerjesztett állapotának potenciális energia felületéről. A molekula szerkezetét megadtuk az elektronikus alapállapot globális és az egyik lokális minimumának a helyén, valamint az ezen két minimumhelyet egymástól elválasztó átmeneti állapotnak megfelelő esetben, és az egyik kónikus kereszteződésnél. A molekula fotostabilitásában fontos szerepet tölt be a kónikus kereszteződés könnyű elérésének lehetősége az első gerjesztett állapot potenciális energia felületén az alapállapottól fényrel történő gerjesztést követően

$$\Delta = \delta \cdot R = 0, \quad H_{12}^{(1)} = \lambda \cdot R = 0. \quad (6)$$

A két kifejezésnek egyidejűleg kell nullával egyenlőnek lennie, amelynek általános esetben történő teljesüléséhez az elágazási tér két különböző koordinátájára (szabadsági fokra) van szükség. Kéttomos molekulák esetén csak egy szabadsági fok áll rendelkezésre. Ezért ebben az esetben egy kivételtől eltekintve, egyidejűleg nem tud teljesülni a két feltétel. Ezt a kivételt a két elektron állapot különböző szimmetriája jelenti, amikor is  $\lambda = 0$ . Ekkor a két elektronállapot tud ugyan kereszteződni, de a csatlóadás erőssége nulla.

Három és többatomos molekulák esetén azonban mindig rendelkezésre áll annyi szabadsági fok, hogy a két feltétel egyidejűleg teljesülni tudjon [4, 2]. Ebben a kétdimenziós térben mindössze egyetlen koordináta pár ( $X_1, X_2$ ) értékre teljesül a degenerancia megjelenésének feltétele, más pontokban azonban nem. Az ezen kétdimenziós térre merőleges, (N-8)-dimenziós alter minden pontja pedig elfajulási pont lesz, ahol N a rendszer szabadsági fokainak számát jelenti, amelyből a 3 translációs és a 3 rotációs szabadsági fok leválasztása után visszamaradó N-6 szabadsági fok a rendszer geometriáját egyértelműen leírja. A kónikus kereszteződések szempontjából leggyakrabban vizsgált 3 atomos rendszerekben ez azt jelenti, hogy a geometria megadásához használt 3 (=3-3-6) dimenziós konfigurációs térben a kónikus elfajulá-

sok helyei vonalakat (az angol terminológiában „seam”-eket) alkotnak. Amennyiben pedig rögzítjük valamelyik általános koordinátát, akkor a vizsgált „síkok” egy-egy pontot fognak ezekből a vonalakból tartalmazni. Többatomos rendszerekben pedig mindez azt jelenti, hogy a kónikus kereszteződések keresése során a konfigurációs térnek egy minimálisan kétdimenziós alterét kell vizsgálnunk.

A nagyon gyors (femtosekundumos,  $10^{-15}$  s) molekuladynamikai folyamatok szinte mindig kónikus kereszteződések keresztül zajlanak le, amelyek fotokémiai tölcserként szolgálnak a gerjesztett rendszer számára, amelyeken keresztül a molekulák sugárzásmentesen, akár 3-4 nagyságrenddel gyorsabban le tudnak gerjesztődni, mint a hagyományos sugárzásos lebomlás során. A következőkben a kónikus kereszteződések két tipikus megnyilvánulási formájával, a molekulák fotostabil viselkedésével és a molekuláris kapcsolókkal kicsit részletesebben foglalkozunk.

### Molekulák fotostabil viselkedése

Szerves molekulák tartós ultraibolya (UV) sugárzás hatása alatt általában nem viselkednek stabilisan. Az UV fotonok hatására a molekulák kovalens kötése felhasadnak, különböző kémiai dynamikai folyamatok játszódhatnak le, amelyek végül a rendszer fragmentációjához vezetnek. Mindezt figyelembe véve, szinte a csodával határos, hogy az állandó napfény hatása mellett az élet mégis teljessé válhat. Bár tudjuk, hogy a sztratoszférikus ózonréteg (ózonpajzs) kiszűri a napfény legveszélyesebb UV összetevőit, ez nem volt mindig így. Az élő szervezetek kialakulása már sokkal hamarabb elkezdődött. Az UV-védelemhez az élő szervezetnek egy nagyon erős kiválasztódási folyamaton kellett keresztül mennie, amely azt sugallja, hogy az élet felépítése kezdetén, majd pedig a biológiai evolúció során nagy valószínűséggel a fotostabilitás volt a döntő kiválasztási kritérium, amely meghatározta az alapvető biológiai építőköveink alakját és szerkezetét. Ilyenek például a négy nukleinsav bázis (adenin, citozin, guanin és timin), amelyek a DNS molekulát alkotják, amely kódolja a szervezet összes genetikai információját. Ilyen a fehérjék rendkívül sokrétű világa, amely mindössze 20féle aminosavból épül fel. És ide tartoznak a szénhidrátok (pld. a cukrok) is, amelyek a DNS váz hátsó részének alkotórészei.

Az utóbbi években figyelemre méltó előrelépés történt a biológiai építőkövek spektroszkópiái és fotoindukált kémiai

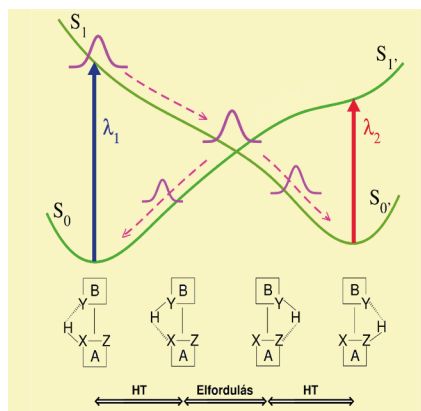
dinamikájának a vizsgálatában. Különös tekintettel a DNS-bázisok, DNS bázispárok, aminosavak és peptidok szerkezetének feltárására. Speciális lézeres párologtatási technikákkal még a törékeny biomolekulák is, például DNS-bázispárok vagy hajtogatott (gubancos) fehérjék is gázfázisba vihetők, majd pedig ún. szupersonikus fúvókák segítségével alacsony hőmérsékletre hűthetők. Ezután a különböző spektroszkópiás technikáknak köszönhetően részletes betekintést kaphatunk a biomolekulák többszörös molekuláris szerkezetébe és a szerkezet specifikus fotokémiájába. Ezek a kutatások egyre inkább bizonyítékot szolgáltatnak arra vonatkozóan, hogy az élet alapvető építőkövei az ultraibolya fotonok felvételét követően rendkívül hatékonyan gerjesztett állapotú deaktiválási mechanizmusokkal rendelkeznek. Úgy tűnik, hogy a potenciálisan veszélyes fotokémiai reakciókat az ultragyors (femtosekundumos) nem sugárzásos legerjesztődési folyamatok hatékonyan leállítják, s a rendszer visszakerül a különösen nagyfokú fotostabilitást biztosító elektronikus alapállapotba [5]. Számítógépes szimulációkkal sikerült kimutatni, hogy a kónikus kereszteződések létrejövő ultragyors, nem Born-Oppenheimeri dinamika alapvető fontosságú szerepet játszik a gerjesztett elektronikus állapotok nagy hatásfokú sugárzásmentes legerjesztődésében az élet alapvető építőelemeiben, valamint hidrogénkötéses szupramolekuláris szerkezetekben, például DNS-ben és fehérjékben.

### Molekuláris kapcsolók

Tipikus nemadiabatikus jelenség, amikor egy molekula két jól meghatározott stabil (és elszeparált) izomer állapota között kónikus kereszteződésen keresztül valamilyen külső hatás (elektromosság, mágnesség, hő stb.) segítségével szabályozott módon ide-oda kapcsolható [6]. Ezen az elven működnek a molekuláris kapcsolók, amelyeknek a bistabilitás mellett még egy másik fontos tulajdonságuk, hogy többszöri kapcsolás (például lézer sugárzás) hatására sem fragmentálódnak.

Egy kapcsolási mechanizmust szemléltet a **3. ábra**. A baloldali izomert egy  $\lambda_1$  hullámhosszú lézerral megvilágítva a rendszer alapállapottól gerjesztett állapotba kerül, majd pedig a gerjesztett állapot energiafelületén az ott jelen lévő gradiens viszonyoknak megfelelően elindul a mag vándorlása, mindeközben a molekula szerkezete folyamatosan változik és végül a jobboldali izomer alapállapotába kerül. Ezt követően hasonló módon egy fordított irányú kapcsolást is létrehozhatunk, ha a jobboldali izomert egy  $\lambda_2$  hullámhosszú fényrel sugározunk be ( $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ). Észrevehetjük, hogy a kapcsoló molekulák alap- és első gerjesztett elektronállapotainak





3. ábra. Molekuláris kapcsoló sematikus működése

energiaprofiljai szoros összefüggésbe hozhatók a kapcsolási mechanizmussal. Fontos követelmény, hogy az alap- és gerjesztett elektronállapotok keresztezzék egymást és a gerjesztett állapot energiájának minimuma legyen a keresztezés pontjában. A kereszteződés nagyon fontos szerepet játszik, hiszen a sugárzásmentes legerjesztődés és ezáltal a nagyon gyors kapcsolás emiatt válik lehetővé. Konkrét elektronszerkezeti vizsgálatok segítségével felderíthetők azok a - rendszer stabil állapotai között lejátszódó - mikroszkópikus folyamatok, amik az elektronállapotok közötti kereszteződéshez vezetnek. Ilyen folyamatok lehetnek például a fotonindukált reverzibilis gyűrű nyitás-záródás, cisz-transz izomerizáció, fotonindukált protontranszfer, speciálisan a gerjesztett állapoton végbemenő intramolekuláris hidrogéntranszfer. Ez utóbbi folyamat kombinálódhat a molekula egy részének az elfordulásával, miközben egy intramolekuláris hidrogénkötés felbomlik, és egy másik kialakul.

A molekuláris kapcsolóknak számos alkalmazási területe van. Kis méretűknél fogva fontos szerepet játszanak a miniaturizálásban, lehetővé téve ezzel nagy sűrűségű adattárolást molekuláris szinten. Ilyenek a legegyszerűbb molekuláris eszközök, melyekkel az elektromos vezetőképességet is kapcsolhatjuk pl. nanocsövek között. Alkalmazhatók az orvostudományban is, mivel a sejtekben történő gyógyszer felszívódása szabályozható a segítségükkel. Használatosak az élő sejtek képzésében és az élő szervezet transzportfolyamatainak szabályozásában is. Molekuláris eszközök tervezéséért és szintéziséért J. P. Sauvage, J. F. Stoddart és B. L. Feringa [7] 2016-ban kémiai Nobel-díjat kaptak.

### Elektrondinamika a kónikus kereszteződéseknél

Egy másik érdekes aspektusa a kónikus kereszteződéseknél, hogy közvetlen környezetükben izgalmassá válik az elektrondinamika

tanulmányozása. Régi vágya ugyanis a kutatóknak, hogy sikerüljön megoldani a molekulák szelektív kötésfelhasításának a problémáját. Erre már a múlt század vége felé történtek kísérletek, de áttörő eredmény nem született. Konkrétan, femtoszekundumos lézerpulzusok segítségével elvégzett pumpa-próba kísérletek során az atommagok dinamikájának szabályozásával próbálták megvalósítani a kötésfelhasítást. Az intramolekuláris vibrációs legerjesztődés gyors és domináló hatása miatt azonban a kívánt kötés felhasítására céltartóan bevitt energia – még mielőtt a kötést felszakította volna – gyorsan és hatékonyan szétszóródott a rendszer rezgési módusain.

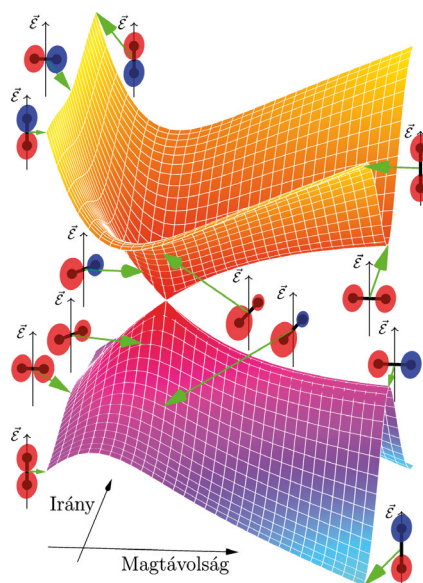
Napjainkban az attoszekundumos lézerpulzusok megjelenésével a probléma ismét előtérbe került, de most az atommagok helyett az elektronokat célozták meg. Az elektronok mozgása általában 3-4 nagyságrenddel gyorsabb a magokénál, és a napjainkra kifejlesztett attoszekundumos lézerpulzusok segítségével megfigyelhetők és szabályozhatók már megvalósítható.

Ismert, hogy kónikus kereszteződés közvetlen közelében, amikor a Born-Oppenheimer közelítés már érvényét veszíti, a kialakuló dinamikát még mindig a magok mozgása vezérli, amelyre nincs hatással az elektronállapotok közötti kialakuló koherencia. Ezért a kónikus kereszteződések környezetét inkább célszerű olyan tartománynak tekintenünk, ahol az elektrondinamika lelassul a magmozgás femtoszekundumos tartományához, mintsem olyan, ahol a magdinamika felgyorsul az elektronok attoszekundumos időskálájához [8]. Vagyis kónikus kereszteződések környezetében az elektrondinamika lelassul, lehetővé téve ezzel az elektronok mozgásának egyszerűbb megfigyelését. Már az első attoszekundumos impulzusok megjelenése előtt érvek hangoztak el mellett, hogy több elektronállapot koherens szuperpozíciójának előállításával elkerülhetővé válik az intramolekuláris rezgési energia gyors szétszóródása, amely ténylegesen lehetővé teheti a kémiai dinamika szabályozását. Napjainkban javában folynak ilyen típusú attoszekundumos pumpa-próba kísérletek, amelyekben a résztvevő elektronenergia felületeket a kónikus kereszteződések körüli tartományokra koncentrálnak. Ennek a tudományterületnek hazai relevanciája is van, mert hasonló kísérletek elvégzését tervezik a hamarosan üzembe lépő Szegedi Szuperlézer Központban is.

### Fénnyel indukált kónikus kereszteződések

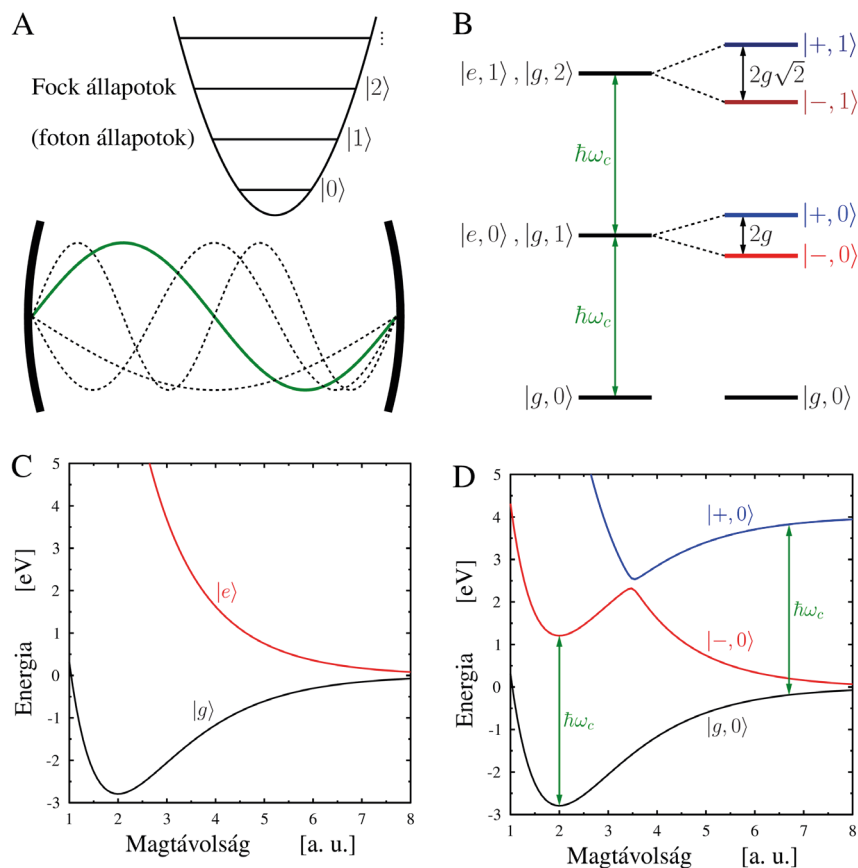
Kónikus kereszteződés lézér fény segítségével is kelthető. Akár álló, akár pedig haladó lézérhullámok segítségével létrehozhatunk rezonáns csatolást két elektronállapot között [9].

Az első esetben a lézér fény a tömegközéppont haladó mozgásához tartozó szabadsági fokot csatolja a belső forgási-rezgési szabadsági fokokkal, míg a második esetben a forgás biztosítja a hiányzó szabadsági fokot, amely a kónikus kereszteződés kialakulásához szükséges. A fénnyel indukált kónikus kereszteződések megjelenése egy új, fizikailag számottevő fény-anyag kölcsönhatás kialakulásához vezet, amelynek hatására jelentősen megváltoznak a molekulák tér nélküli dinamikai tulajdonságai. A mesterségesen létrehozott nemadiabatikus hatás már kétatomos moleku-



4. ábra. A  $H_2^+$  molekula adiabatikus potenciális energia felületei lézér fény jelenlétében (Floquet-közelítés). Az egyik koordináta megegyezik a kétatomos rendszerekben "szokásos" magok közötti távolsággal. A másik szabadsági fokot a molekula forgása szolgáltatja. Ennek megfelelően a kétdimenziós elágazási tér második koordinátáját a molekula tengelynek a lézér tér polarizációs irányával bezárt szöge adja. Sematikusan feltüntetünk néhány felületponthoz tartozó elektron hullámfüggvényt is. Amikor az egyik atommag körüli elektron kék színnel van jelölve, az elektron-hullámfüggvény előjele ellentétes a két atommag közelében

lák esetén is jelentős, ahol szimmetria okokból "természetes kónikus kereszteződések" nem fordulhatnak elő. Lézér fény segítségével lehetőség nyílik jelentős mértékű, változtatható nagyságú nemadiabatikus hatás mesterséges bevitelére, s ezzel mintegy új irányt szabván a molekuláris kvantum kontroll területén. A mesterségesen létrehozott erős nemadiabatikus hatás szabályozható módon csatolja a molekulák



5. ábra. (A) Rezonátorban kialakuló állóhullám módusok és a kialakuló kvantált Fock állapotok illusztrációja. (B) Kombinált anyag-tér vagy ún. felöltötetett atomi polariton állapotok  $|\pm, n\rangle$ . (C) Kétatomos molekula alap és gerjesztett térmentes elektronállapotai. (D) Csatolás egy rezonátor módus vákuum állapotához (zöld nyíl), amely molekuláris felöltötetett állapotok kialakulásához vezet  $|\pm\rangle$

különböző elektronállapotait, amely hatására a nemadiabatikus csatolás szingulárisává válik a kónikus kereszteződések helyén. Van azonban egy lényeges különbség a természetes kónikus kereszteződések és a lézer fényvel indukált megfelelőik között. Míg a természetes kónikus kereszteződések nem szabályozhatóak, addig a fényvel indukált megfelelőik igen. Ez utóbbiak helyzetét a lézer frekvenciája, míg a nemadiabatikus csatolásuk erősségét a lézer intenzitása határozza meg. Változtatva a frekvenciát és intenzitást, eltérő hatású kónikus kereszteződések alakíthatunk ki. Ilyen módon szabályozni lehet a molekuláris rendszerbe mesterségesen bevitt nemadiabatikus hatások erősségét és az általuk módosítani kívánt dinamikai folyamatokat.

Megjegyezzük, hogy - a fényvel indukált kónikus kereszteződések dinamikát módosító hatását illetően - az eddig kapott, főleg elméleti eredmények [10] nagyon hasonlóak ahhoz, ami a szabad többatomos molekulák dinamikai viselkedésénél tapasztalható, ahol a természetes kónikus kereszteződések fejtik ki erős nemadiabatikus hatásukat [2] a magok és az elektronok mozgásának erős csatolódása következtében. Fontos eredmény, hogy

a LICÍ megjelenését kísérő kvantuminterferencia jelenséget már kísérletileg is sikerült kimutatni kétatomos molekulákban [11]. A jelenségnek érdekes topológiai vonatkozásai is vannak [12], amellyel most nem foglalkozunk.

### Kónikus kereszteződés üregrezonátorban

Két elektronállapot közötti rezonáns csatolás üregrezonátorban is létrehozható. A jól ismert "két elektronállapotú atom kölcsönhatása a sugárzási tér egy rezonáns módusával" modellt kiegészítve a magok rezgési szabadsági fokával (vagy fokokaival, több atomos molekulák esetében) erős nemadiabatikus hatás hozható létre az elektronikus, rezgési és foton módusok csatolásán keresztül [13]. Amennyiben többatomos molekuláról van szó - a két vagy több rezgési szabadsági fok jelenléte miatt - a feltételek kónikus kereszteződés kialakulásához adottak [14], míg kétatomos esetben egy második dinamikai koordinátára is szükség van, ami lehet a forgás is.

Ahhoz, hogy rezonáns csatolás kialakulhasson, még fotonra sincs feltétlenül szükség. Ezt létrehozhatja a vákuum is. Az ilyen módon létrehozott nemadiabatikus hatás élettartama kizárólag az üregrezonátor hatásfokától függ (disszipáció stb.), mert a folyamathoz nincs szükség véges idejű lézerpulzusra. Egy másik lényeges különbség az előző pontban tárgyaltakhoz képest, hogy a rezonátor csatolási állandójának növelésével (ami ekvivalens az intenzitás növelésével a klasszikus fény által indukált kereszteződések esetén) úgy növelhető a nemadiabatikus hatás erőssége, hogy közben a molekula nem ionizálódik [15]. Ez utóbbi haszna, akkor látszik majd igazán, ha sikerül kidolgozni a megfelelő kísérleti protokollokat. Erre mostanában egyre több próbálkozás történik. Előnye lehet még ennek a leírásnak, hogy lehetővé teszi mind az egyetlen (g), mind pedig a  $(g/N)$  kollektív csatolási állandótól függő nemadiabatikus molekuláris tulajdonságok vizsgálatát.  $\diamond$

Az ELI-ALPS projekt (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### Irodalom

- [1] M. Born, J. R. Oppenheimer, *Ann. Phys. s. (Leipzig)* **84**, 457 (1927).
- [2] W. Domcke, D. R. Yarkony, H. Köppel, *Adv. Ser. in Phys. Chem. Conical Intersections*, **15** (2004).
- [3] J. von Neumann, E. P. Wigner, *Z. Physik*, **30**, 467 (1929).
- [4] E. Teller, *J. Phys. Chem.* **41**, 109 (1937).
- [5] W. Domcke, A. L. Sobolewski, *Nature Chem.* **5**, 257 (2013).
- [6] A. L. Sobolewski, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **10**, 1243 (2008); A. Csehi, G. J. Halász, Á. Vibók, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 18048 (2013).
- [7] *Molecular Switches*, ed. B. L. Feringa, Wiley-VCH, 2001.
- [8] F. Lépine, M. Y. Ivanov, M. J. J. Vrakking, *Nat. Photonics* **8**, 195 (2014).
- [9] M. Sindelka, N. Moiseyev, L. S. Cederbaum, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **44**, 45603 (2011).
- [10] G. J. Halász, M. Sindelka, N. Moiseyev, L. S. Cederbaum, Á. Vibók, *J. Phys. Chem. A* **116**, 2636 (2012); G. J. Halász, Á. Vibók, L. S. Cederbaum, *J. Phys. Chem. Lett.* **6**, 348 (2015). A. Csehi, G. J. Halász, L. S. Cederbaum, Á. Vibók, *Faraday Discuss.*, **194**, 479 (2016).
- [11] A. Natan, M. R. Ware, V. S. Prabhudesai, U. Lev, B. D. Bruner, O. Heber and P. H. Bucksbaum, *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 143004 (2016).
- [12] M. V. Berry, *Proc. R. Soc. London A* **392**, 45 (1984).
- [13] M. Kowalewski, K. Bennett and S. Mukamel, *J. Phys. Chem. Lett.*, **7**, 2050 (2016).
- [14] J. Flick, M. Ruggenthaler, H. Appel and A. Rubio *PNAS*, **10.1073/pnas.1615509114**. (2017)(2017).
- [15] A. Csehi, G. J. Halász, L. S. Cederbaum and Á. Vibók, *J. Phys. Chem. Lett.*, **8**, 1624 (2017).



# Wigner Jenő, a fasori diák

„A tudomány sosem képes a természet rejtélyeit megoldani, mivel a rejtélynek mi magunk is részesei vagyunk.”  
(Max Planck)

Az Európai Fizikai Társaság (EPS) a Budapest-Fasori Evangélikus Gimnáziumot a volt tanítvány, Wigner Jenő emlékére 2015. április 23-án fizikai emlékhellyé nyilvánította, Európában huszadikként. Az emlékhely avatási ünnepélyén, és az azt követő Wigner Konferencián köszöntőt mondott, illetve előadást tartott többek között *Luisa Cifarelli*, az EPS előző elnöke, *Kroó Norbert* akadémikus, az EPS tiszteletbeli tagja, iskolánk igazgatója, *Hajdó Ákos*, valamint jelenlétével megtisztelte az eseményt *Liptay György*, a Budapesti Evangélikus Gimnázium Volt Növendékek Egyesületének tiszteletbeli elnöke, az Egyesület más tagjai, *Vattamány Zsolt*, Erzsébetváros polgármestere, valamint iskolánk érdeklődő tanárai és diákjai.

A sors különös kegye folytán abban a megtiszteltetésben részesültem, hogy megemlékezhettem Wigner Jenőről, a tudósról, az emberről, a tanárról.

Ki is volt Wigner Jenő? A New York Times szellemes megfogalmazása szerint Wigner egyike volt azoknak a Budapesten született és nevelkedett tudósoknak, akik azért mentek Nyugatra, hogy átalakítsák a modern fizikát. És valóban.

Wigner Jenő szerencsés ember volt. „A téridő egyik legalkalmasabb helyén”, abban a XX. században született Budapesten, amely a fizika tudományát szédítő sebességgel emelte a magaslatokba.

A Király utcai szülőházán emléktábla található. A Budapesti Ágostai Hitvallású Evangélikus Főgimnáziumba járt, ami akkor „Magyarország egyik legjobb iskolája” volt, ahogy *Harsányi János* Nobel-díjas tudósunk írta emlékirataiban. Wigner Jenő Neumann fölött járt egy évvel. Középiskolai tanulmányait követően a Műegyetemre iratkozott be, amely nem elégítette ki egyre növekvő tudásvágyát, így 18 évesen a Berlini Műszaki Egyetem hallgatója lett.

Bár a Vegyészmérnöki Karra iratkozott be, érdeklődése a fizika felé fordult. Következő kivételes szerencséje, hogy akkor Berlin volt a fizika világközpontja. A Berlini Egyetemen tartotta heti üléseit a Német Fizikai Társulat, ahol egymás mellett ült *Einstein*, *Planck*, *Heisenberg* és *Pauli*, hogy csak a legnagyobb neveket említsem. Itt ismerkedett meg *Szilárd Leóval*, akihez élete végéig hú barátsággal kötődött.

A berlini évek után, Hitler hatalomra jutását nem várva meg, barátaival együtt Amerikában telepedett le. Wigner néhány év kitérővel Princetonban élt és kutatott

1995. január 1-jén bekövetkezett haláláig. Még nyolcvan éves korában is a fizika több területén önálló tudományos kutatást folytatott. Munkásságát 61 éves korában, 1963-ban Nobel-díjjal jutalmazták.

Wigner, Heisenberg, Dirac és Neumann, ők négyen végezték el a kvantummechanika klasszikus fizikától immár független megalapozását, amely bevészte nevüket a tudomány történetébe.



Érdekeséggépp megemlítem, hogy a – ma is működő – Fasori Arany János Önképzőkörben 1919-ben 17 évesen már ugyanezen témán dolgozott. Beadott házi dolgozatára érdemkönyvi (bizonyítványba kerülő) dicséretet kapott tanáraitól, *Mikola Sándortól* és *Rácz Lászlótól*.

A fasori tanárok a legkiválóbb diákokat szombat délutánonként kávéházba hívták, ahol nem a pesti pletykákról, hanem a differenciálszámítás rejtelméről beszélgettek. A kávéházi mulatságok kiegészítéseként a diákok a mai 309-es számú előadóban fizikagyakorlatra jártak, ahol Mikola Sándor pipával pőfékelve figyelte diákjai fáradozásait. Érdemes megemlíteni, hogy a fizika elméleti oktatása mellett Mikola Sándor vezette be a fizikai gyakorlatokat is. Az ő tankönyvből merítette középiskolai ismereteit: ebben Newton tehetetlenségi törvénye „téltlenség” törvényeként szerepelt. Sem ő, sem kollégái nem fukarkodtak a diákok dicséretével, amit Wigner hazalátogatásaikor is meleg szívvel emlegetett. Rácz László a gimnázium főigazgatói címéről is lemondott azért, hogy minden idejét tehetséges diákjainak szentelje.

Wigner Jenő a kvantummechanikán túl a csoportelméletben, a részecskefizikában, az energetikában, a szilárdtest-fizikában és az asztrofizikában egyaránt maradandót alkotott. A II. világháború alatt részt vett az első atomreaktor tervezésében.

Magyarországi látogatásai közül két eseményt szeretnék kiemelni. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem 1987-ben avatta díszdoktorává, míg a Magyar Tudományos Akadémia tiszteletbeli tagjává 1988-ban választották. Az ő sok szerencséje mellett én is szerencsésnek érezhetem magam, hiszen személyesen találkoztam vele. Pontosán emlékszem a dátumra, 1987. november 18. Egyetemi előadásaink a Múzeum körüli TTK D épületében voltak, az akkori Elméleti Fizika Tanszéken. „Fénysebességgel” terjedt a hír, hogy Wigner előadást tart, így a teljes Fizika Tanszék tanárostul, diákostul gyorsuló mozgással vette be a Gólyavárat, hogy helyet szerezhessen a tudós közeli gravitációs terében. Az őszi nap lágy sugarai csendes érdeklődéssel hatoltak át a hatalmas ablaktáblákon. A makro- és a mikrovilág találkozásáról volt szó, és ennek kutatására lelkesített minket, hallgatókat. Az ekkor 85 éves Wigner friss, a legújabb kutatási eredményeket is magába foglaló már-már szónoki beszéde úgy hatott a hallgatóságra, mint a hosszú őszi délután csendjében a mélyhegedű hangja. Úgy éreztem, hogy valóban találkozott a mikro- és makrovilág.

Ezután került sor díszdoktorrá avatására a Jogi Kar dísztermében, rendkívül ünnepi hangulatban.

A Szózat hangja meghatotta a tudóst, aki látható érdeklődéssel kutatta emlékeiben a dal forrását.

Wigner Jenő magyar voltát soha nem tagadta meg, de érezte, elszakadt szülőföldjétől.

Tudományos munkássága örökös büszkesége gimnáziumunknak és nemzetünknek egyaránt.

Befejezőként álljon itt Wigner ars poetica:

„Igazi boldogság tudni, hogy fizikus vagyok. Mi más mérhető ehhez, mint a szerelem?”

PALÁGYI GYÖRGYNÉ,  
Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium  
2015. június 26.

RADNAI GYULA

# Párhuzamos életek

## Különleges születési évfordulók 2017-ben

### Második rész

*Párhuzamos életek – Bioi paralleli – ezt a címet adta Plutarkhosz csaknem kétezer évvel ezelőtt írt művének, mely magyarul Párhuzamos életrajzok címmel jelent meg a XX. században, Máthé Elek fordításában. Most, ennek a három részes cikksorozatnak a célja olyan tudósanárók életének egymás mellé állítása, akik ugyanabban az évben születtek 100, 150 vagy éppen 300 évvel ezelőtt, de más-más országban, más-más környezetben éltek le életüket, bontakoztatták ki tehetségüket. A párba állított életpályák egyike mindig valamelyik magyar tudósanáré, de ezt minden esetben megelőzi egy-egy olyan nevezetes, világhírű természettudós életének felidézése, aki ugyanabban az évben született. Elkerülhetetlenül adódik az összehasonlítás nemcsak a két személy, hanem a két ország akkori állapota között is. Szeptemberi lapszámunkban foglalkoztunk a legrégebbiekkkel, a 300 évvel ezelőtt születettekkel. Most két olyan tudósra kerül sor, akik 150 éve születtek.*

#### Marie Skłodowska Curie (1867–1934)

Európa nagyhatalmi játszmái következtében 150 évvel ezelőtt nem szerepelt Európa térképén Lengyelország. 1795 óta, amikor Ausztria, Poroszország és Oroszország felosztották egymás között az országot, a lengyelek időnként felkeléseket szerveztek önállóságuk visszaszerzésére, de ezeket a próbálkozásokat az említett hatalmak rendre levertek és megtörtölték.



Marie Skłodowska Curie

(Érdemes megemlíteni, hogy az 1830-as felkelés egyik kimagasló lengyel parancsnokát Bem Józsefnek hívták, valamint, hogy Varsó ekkor csupán az orosz városok egyike volt...)

Marie születésének idején még élénken élt a lengyelek emlékezetében az 1863-ban kirobbant lengyel felkelés, amelyet ugyan-

csak kíméletlenül leverte Oroszország. A teljes oroszosítást a lengyel nyelv betiltása és „tájnyelvvé” degradálása tetőzte be. Az értelmiség elszegényedése Władysław Skłodowski (1832–1902) családját is elérte. A matematika-fizika szakos tanár édesapja nem tudta fizetni lányai egyetemi továbbtanulását, amire amúgy is csak külföldön lett volna lehetőség. Marie ekkor megállapodott két évvel idősebb nővérével, Bronyával, hogy támogatni fogja orvosi tanulmányait a Sorbonne-on, mégpedig úgy,

rez, majd utána hazatér tanítani. A lengyel nemzeti érzés, melyet édesapja ültetett el benne, akkor már életének egyik vezérelvévé vált.

1894-ben megszerezte a képesítést fizikából és a következő tanév végén kellett volna vizsgáznia matematikából. Nyáron hazament, megpróbált a krakkói egyetemen álláshoz jutni, de nem sikerült. (Krakkó és környéke 1846-ig még független, semleges területnek számított.) Viszszament Párizsba, ahol a nála nyolc évvel



Varsóban, 6 évesen

hogy itthon nevelőnői állást vállal jobb módú családoknál és az ezért kapott pénz legnagyobb részét elküldi Párizsba a nővérének. Hat évig nevelőnősködött, mire nővére elvégezte az egyetemet és kihívta magához Párizsba, hogy most ő támogassa húga továbbtanulását. Marie azzal a szándékkal ment ki, hogy tanári diplomát sze-



Párizsban, 1895-ben: Pierre és Marie, az ifjú házaspár

idősebb fizikus, Pierre Curie várta izgatottan Marie döntését: hajlandó-e hozzájönni feleségül. Pierre Curie-nek akkor már jó neve volt a fizikában: három évvel idősebb Jacques bátyjával ök fedezték fel a piezoelektromosságot. Akkoriban éppen a fémek mágneses tulajdonságait kutatta.





Kerékpáros nászúton és a laborban

A ferromágnesség Curie-pontja és a paramágnesség hőmérsékletfüggésének Curie-törvénye máig őrzi nevét e tudományban.

1895 sikeres év volt Pierre Curie számára: megvédte doktori disszertációját, és feleségül vehette a lengyel Marie Skłodowskát. Szűk körű, polgári esküvőt tartottak, két kerékpár volt a legfontosabb nászajándék, amelyen azután bejárták az egész környéket. Ez lett a nászútjuk.

1896-ban Marie megkapta teljes jogú matematika-fizika szakos tanári diplomáját – az ő vizsgái sikerültek legjobban a csoportban. Úgy gondolta, ő is megcélozhatná a doktori címet fizikából. Valami aktuális, modern témát keresett. Kapóra jött *Henri Becquerel* (1852–1908) felfedezése az uránsugárzásról, amely akkor még meglehetősen háttérbe szorult *Conrad Röntgen* (1845–1923) felfedezése mellett. Marie-t az fogta meg, hogy ez a „Becquerel-sugárzás” az urán bármely vegyületében csak az urán mennyiségétől függ, tehát nem kémiai, hanem fizikai tulajdonsága az anyagnak, magára az anyag atomjaira lehet jellemző. Amikor pedig kiderült, hogy az uránszurokércből több sugárzás jön ki, mint magából az uránból, tehát valamilyen új, eddig ismeretlen elem sugárzásáról is szó lehet, Pierre felhagyott saját kutatási témájával, hogy feleségének segíthessen. A romantikus történet közismert, így jutottak el 1898-ban a polónium, majd a rádium felfedezéséhez. A neveket is Marie adta ezeknek az új elemeknek, mint ahogy tőle származik a radioaktivitás kifejezés is. Évekig tartó munkával sikerült több tonna ércből néhány tized gramm rádium-kloridot izolálniuk. Megnőtt érdeklődő látogatók száma, egyre többször mentek ők is előadni a kutatásaikról. 1900-ban Marie részfoglalkozású tanári állást kapott: az École normale supérieure-ben kellett lányokat tanítania. Miközben otthon a gondos anya és a jó feleség szerepe várta, halaszthatatlannak tűnt a laboratóriumi műhelyben a kutatás. Mindehhez járult most a tanítás. 1897-ben született meg



Iréne lánya, a „kis királynő”, a család kedvence. Nevelésében a francia nagyapa, Pierre édesapja segítette, aki orvos volt és Iréne születése óta velük lakott.

1903-ban Marie már meg tudta határozni a rádium atomsúlyát, ezt 225-nek találta. (Az atomsúly – mai neve moláris tömeg – pontos értéke rádiumra 226 g/mol.) Megírta a doktoriját és beadta, a tekintélyes bizottság pedig úgy ítélte meg, hogy ilyen jó színvonalú doktori munka még nem volt előttük. Lelkendezve adták meg a doktori fokozatot. A sikeres vizsga örömeire otthon kis kerti ün-



Kislányaival 1906 nyarán

nepséget tartottak. Pierre egyik volt doktoranduszát, *Paul Langevint* (1872–1946) kérték fel az ünnepség megszervezésére, aki az előző évben védte meg doktoriját. Ott volt *Jean Perrin* (1870–1942) és az éppen Párizsban tartózkodó *Ernest Rutherford* (1871–1938) is. Az ünnepség végén, már sötétedés után Pierre meglepetéssel szolgált: mindenkinek a helyére ültetett, majd előhúzott a zsebéből egy kis fiolát, melyben oldott rádiumsó

volt, az üveg falán pedig cink-szulfid réteg, és felmutatta. A fiola, mint egy kis fáklya, világított... Megbabonázva nézték. (Pierre és Marie egyáltalán nem voltak elővigyázatosak. Marie az ágya mellett tartott egy ilyen kis fiolát, hogy ne kelljen éjjel a sötétben botorkálnia...)

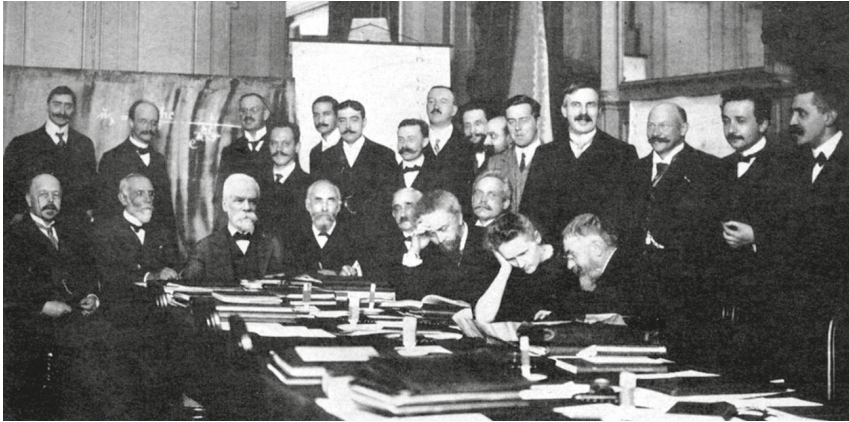
Mind a fizikai, mind a kémiai Nobel-bizottságban felmerült, hogy felfedezésükért ők kapják meg az 1903. évi Nobel-díjat. (Később is gondot okozott, hogy egy anyag szerkezeti vonatkozású kutatási eredményért kémiai vagy fizikai Nobel-díjat adjanak valakinek. Emlékezetes, hogy Rutherford például kémiai Nobel-díjat kapott 1908-ban „az elemek bomlásának vizsgálataiért”.) 1903-ban a fizikusok győztek: a fizikai Nobel-díjat ítélték oda *Henri Becquerel*nek és a Curie házaspárnak „a spontán radioaktivitás felfedezéséért és e sugárzás tanulmányozásában való érdemeikért.” A sok munka és megromlott egészségi állapotok Curie-ék számára csak 1905-ben tette lehetővé, hogy átvegyék a díjat Stockholmban. Közben 1904-ben megszületett Ève lányuk, ez se könnyítette meg Marie helyzetét. A sors azonban még kegyetlenebb meglepetést tartogatott: 1906 áprilisában Pierre meghalt egy közúti balesetben.

Ekkor Marie vette át Pierre laboratóriumát és az ezzel járó előadást is a Sorbonne-on. Nem hagyta el magát. Kétéves kislánya mellé nevelőnőt fogadott, kilencéves kislányát pedig kivette az iskolából és egyetemi kollégáival összefogva, magániskolát szervezett összesen tíz, hasonló korú gyerek számára. Ő tanította nekik a fizikát, Perrin a kémiát, Langevin a matematikát. Gondoskodott a gyerekek testi és művészeti neveléséről is, megfelelő tanárok felkérésével. Két évig működött ez a közös magániskola.

1908-ban a Sorbonne professzorává nevezték ki, ő lett az első női professor Franciaországban. Ebben az évben sikerült tiszta fémrádiumot előállítania. 1910-ben elfogadta a jelölést a Francia Tudományos Akadémia tagságára. Itt is ő lett volna az első nő, de a sajtóban hadjárat indult az „idegen nő” ellen és a választáson 26:28 arányban alulmaradt egy minden szempontból megfelelő francia férfival szemben. Se neki, se a lányának nem sikerült bekerülnie a Francia Tudományos Akadémia tagjai közé. Némi elégtétel Marie Curie számára, hogy az első nő, aki Franciaországban akadémikus lett, éppen az ő egyik tanítványa volt: *Marguerite Perey* (1909–1975), akit 1962-ben vettek fel akadémikusnak. A nagy Académie des Sciences, melyet 1666-ban alapítottak, 1962-ig nem vett fel nőt a tagjai sorába.

1911-ben Marie Curie-t kémiai Nobel-díjjal jelölték.

1911. november elején Belgiumban megtartották az első Solvay-konferenciát, erre Marie Curie és Paul Langevin is hivatalos volt Franciaországból. Közben otthon be-



Brüsszel, 1911. november: az első Solvay-konferencián

törték a feleségétől akkor már külön élő Langevin lakásába és ellopták a Marie által neki írt leveleket, majd a sajtóban nyilvánosságra hozták ezeket. Langevin ebben az évben vált el feleségétől, azonban Marie jó hírét a szenzációra éhes sajtóból tájékozódó olvasók számára hosszú ideig nem lehetett helyreállítani. A kémiai Nobel-bizottság képviselőjében Svante Arrhenius (1859–1927) írt is egy érdeklődő levelet

ai mentőautót rendezett be a sebesült francia katonák vizsgálatára, megszervezte az ápolónők kiképzését. Lányait a háború kitörésekor Angliába küldte ismerősökhöz, majd Irène-t, amikor 18 éves lett, visszahívta, és őt is kiképezte. Párizs német megszállásától félve, az egész rádiumkészletet vonaton Bordeaux-ba vitte és ott egy bank pánccsasztranyájában helyezte el. Utána visszavonatozott Párizsba.



Planck, Mme Curie, Lorentz és Einstein az 1927-es Solvay-konferencia első sorában

a francia akadémiának. Langevin ügyességén, diplomáciai érzéken múlt, hogy Arrhenius kielégítő és megnyugtató választ kapott, s ezután már nem volt semmi akadály annak, hogy Marie Curie-nek ítéljék az 1911. évi kémiai Nobel-díjat „a rádium és a polónium felfedezéséért, a rádium fémállapotban való előállításáért, természetének és vegyületeinek vizsgálatáért.” Marie összezdte minden erejét és 1911. december 11-én megtartotta Nobel-előadását Stockholmban. Kijelentette, hogy a díjat úgy tekint, mintha ismét Pierre-rel együtt kapta volna meg. Utána idegkimerültséggel kórházba került, de még azt is titkolni kellett a sajtó előtt, hogy melyik kórházba vitték. Irène 14 éves volt ekkor, Éve pedig 7. Ideiglenesen Perrinék vették magukhoz a gyerekeket.

Marie Curie nimbuszát az első világháború során végzett tevékenysége állította helyre Franciaországban. Húsz radiológiai

A háború után a már 1914-ben létrehívott, de csak 1918-tól működő párizsi Rádium Intézet javára 1921-ben előadókörútra indult az Egyesült Államokba, amelyre lányait is magával vitte. Hazajövele után Irène-t maga mellé vette a Rádium Intézetben asszisztensnek. Langevin segítségével férjét is talált neki, és örült, hogy az ifjú férj – aki később maga is felvette a Curie nevet és így lett Frédéric Joliot-Curie (1900–1958) – ugyanazt a témát kutathatja, amit ő vezetett be a tudományba. Még egyszer vállalkozott amerikai körútra 1929-ben, amikor ismét nővéreinek akart segíteni, akivel kölcsönösen támogatták egymást a Sorbonne-on való továbbtanulásban. Bronislawa Skłodowska (1865–1939) akkor már az 1925-ben közösen alapított varsói Rádium Intézet igazgatója volt, az ő intézete számára szerzett támogatást Marie Skłodowska Curie az Egyesült Államokban.

Élete utolsó éveit kisebbik lányával töltötte, aki haláláig ápolta őt, 1937-ben pedig megírta édesanyja élettörténetét. Éve Curie (1904–2007) tehetséges zongoristának indult, majd kiváló újságíróként élte le hosszú életét – az ő élettörténete is kitenne egy jókora könyvet. Az édesanyjáról írt dokumentumregény olyan sikeres lett, hogy számos nyelvre lefordították és még film is készült belőle a negyvenes évek elején az Egyesült Államokban. Magyarul 1962-ben jelent meg a Gondolat Kiadó Sikerkönyvek sorozatában, több mint 30 ezer példányban.

Ma is sok fiatal lány és fizikus hölgy számára minta Madame Curie élete, tudományos elkötelezettsége, családszerete, eredeti és választott hazája iránt érzett hazaszerete.

### Pallagi Gyula (1867–1903)

Sajátosan magyar sors az övé – élettörténete jó példa arra, hogyan alakulhatott egy „népi” tehetség élete a kiegyezést követő, polgárosuló Magyarországon.

Kárpátalján, Beregújfaluban született, református lelkészi családban, ötödik gyermekként. (Beregújfalu orosz nevet kapott a



Pallagi Gyula (1867–1903)

szovjet időkben, de a Szovjetunió felbomlása után, 1992-ben Ukrajnától visszakapta eredeti nevét.) Édesapja nem sokkal a hatodik gyermek születését követően elhunyt. A hat gyermekével egyedül maradt édesanya számára a mindennapi betevő falat biztosítása is gondot jelentett. Hiába volt Gyula majdnem a legkisebb gyerek a családban, a tiszacsécsi elemi iskola kiváló elvégzése után neki is otthon kellett maradnia, segíteni a gazdaságban. Szerencsére néhány évvel idősebb, Erzsi nevű nővérebe beleszeretett Móríc Bálint, egy helyi jómódú parasztleány, és miután ők összeházasodtak, anyagilag segítettek az akkor már 14 éves fiút, hogy továbbtanulhasson a Debreceni Református Kollégiumban. (Móríc Bálint és Pallagi Erzsébet házasságából született 1879-ben Tiszacsécsén Móríc Zsigmond.)





Pallagi Gyula tér, Kisújszállás

Különbözeti vizsgát kellett tennie, hogy évfolyamvesztésként felvételt nyerhesen, de azután a kollégiumban különösen matematikából, valamint latin és görög nyelvből kiválóan teljesített, és 1888-ban sikeresen leérettsgéztett.

1888 és 1892 között a budapesti tudományegyetem hallgatója volt. Menynyiségtan-termesztan (értsd: matematika-fizika) szakos középiskolai tanári oklevelét a pozsonyi kereskedelmi akadémián (értsd: szakközépiskolában) töltött gyakorló éve után kapta meg 1893-ban. Egyetemi éve alatt magántanítványokat vállalt és nyelveket tanult, ő maga is készített műfordításokat. Több irányú tehetségére felfigyelt tanára, Eötvös Loránd, aki saját tanszékén ajánlott fel számára egy, az akkori gyakorlatnak megfelelően díjtalan tanársegédi állást. Ezt sajnos nem tudta elfogadni, mert fizetéses állást kellett keresnie – most már nemcsak saját megélhetésének biztosítására, hanem otthon maradt családjának támogatására is. Sikeresen pályázott meg egy református kollégiumi tanári állást Kisújszálláson, itt ezután matematikát és fizikát, de rendkívüli tárgyként francia nyelvet is tanított.

Budapestről elkerülve is kapcsolatban maradt a tudománnyal: már 1893-ban megjelent „A kvadratikus alakok elméletének két problémája” c. cikke a Matematikai és Physikai Lapokban, majd elkészítette és 1895-ben Budapesten sikeresen megvédte „A Fourier-féle sorok összetartásának kritériumairól” című doktori disszertációját. Kik doktoráltak még ugyanebben az évben Bu-

dapesten? Matematikából Kovács Zoltán (1871–1912), aki Győrben tanított és mellette kiváló fizikakönyvet írt a gimnáziumok számára (mellesleg ő volt Kovács Margit kerámiaművész édesapja). Fizikából Tangl Károly (1869–1940) doktorált ekkor, akit azután Eötvös Loránd vett maga mellé a tanszékre, a Pallagi Gyulának is felajánlott tanársegédi állásra, s aki később aktív résztvevője lett Eötvös gravitációs kutatásainak, és az 1920-as évektől kezdve Eötvös utódként vezette a Kísérleti Fizika Tanszékét.

Kiváló tudományos és pedagógiai munkásságának elismeréséül három év elteltével, 1896-ban Pallagi Gyulát ki-nevezték a kisújszállási református kollégium igazgatójának. Ekkor se feledkezett meg családja támogatásáról: felvette unokaöccsét, Móricz Zsigmondot a kollégiumba, lehetővé téve számára az érettségi vizsga letételét. (Móricz Zsigmondot előzőleg eltanácsolták a sárospataki református kollégiumból – elkészerítő tapasztalatait írta meg később *Légy jó mindhalálig* című regényében.) Még azt is felajánlotta számára Pallagi Gyula, hogy ha egyetemre szeretne menni, javasolhatja az akkoriban szerveződő Eötvös Collegiumba való felvételt, de az öntudatos fiatal író ezt már nem fogadta el. Viszont hálásan emlékezett vissza jövevény nagybátyjára, később megörökítette őt *Forr a bor* című regé-



Móricz Zsigmond Gimnázium, Kisújszállás

nyének egyik rokonszenves alakjában. A Pallagi Gyula által felvirágoztatott kisújszállási református kollégium idén ünnepelte alapításának 300. évfordulóját, s ma már Móricz Zsigmond nevét viseli. Pallagi Gyuláról teret neveztek el Kisújszálláson.

Pallagi Gyula rendkívül aktív, intenzív életet igyekezett élni, mintha csak érezte volna, hogy nem sok ideje van hátra. Iskolaiigazgatói tevékenysége mellett könyveket fordított, ismeretterjesztő előadásokat tartott, rendszeresen publikált az *Uránia* folyóiratban, de még a *Budapesti Szemlé-*

ben is ő emlékezett meg Helmholtzról egy húszoldalas cikkben. Tankönyvet írt közösen egy kollégájával, az Athenaeum Kiadó felkérésére pedig önállóan elkészítette egy országos terjesztésre szánt VII. és VIII. osztályos, két kötetes fizika tankönyv vázlatát. Ennek a tankönyvnek a megírására azonban már nem kerülhetett sor, mert 36 éves korában váratlanul elhunyt tüdőgyulladásban.

Pallagi Gyula élete sajátosan magyar sors a XIX. és XX. század fordulójának vidéki Magyarországon. *Kántor Sándorné* matematikatörténésznek sikerült felkutatnia Pallagi Gyula valamennyi publikációját, ezeket most megemlékezésül közöljük, születésének 150. évfordulóján.

### Pallagi Gyula irodalmi munkássága

A villamosságról. Magyar Ifjúság. 1891. Megjegyzések a quadratikus alakok elméletéhez. Math. Phys. Lapok, 1893, 130–137.

A pszichológia legközelebbi feladatai a pedagógiában. Tiszántúli tanáregyesület évkönyve 1898, 67–83.

Helmholtz. Budapesti Szemle 1898, 56–76.

Mathematikai és physikai földrajz a gimnáziumok 3. osztálya számára. (Bodnár Lajossal közösen.) Pozsony, 1899.

Mit tanultak száz évvel ezelőtt? Kisújszállási Ev. Ref. Fögimn. Ért. 1899/1900, 3–26.

Rajzok a természet köréből. Budapest, 1900. Lampel-Wodianer.

A természettudományi megismerés alapjai. Budapesti Szemle 1900, 161–190.

A matematikáról. Uránia 1900, 5. szám, 4–7.

[Az energia megmaradása I, II, III. Uránia 1901, 158–161, 188–194, 241–248.

A piros ákác virága, mint chemiai reagens. Uránia 1901, 250.

Az emberi szellem fejlődéséről. Sárospataki Lapok 1901.

Keszi Hajdú Lajos. Kisújszállási Ev. Ref. Fögimn. Ért. 1900/1901, 3–8.

A gyermeki lélek. Kisújszállási Ev. Ref. Gimn. ért. 1901/1902, 3–51.

Megjegyzések az energiatörvény philosophiájához. Uránia, 1902, 117–189.

A fejlődési világnézet. Uránia 1902, 281–298.

Hány tünemény lehet a világon? Uránia 1903, 120–123.1.

# XXVI. TERMÉSZET–TUDOMÁNY DIÁKPÁLYÁZAT

Megjelenik az Emberi Erőforrások Minisztériuma  
és a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala támogatásával

## Fazekas Mihály életműve

PETRITY LUCA

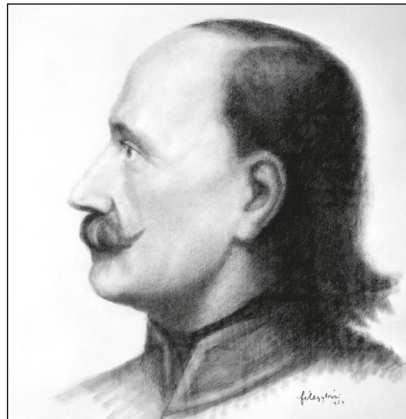
Csongrádi Batsányi János Gimnázium, Szakgimnázium és Kollégium

*Tavaly emlékezhettünk meg arról, hogy 250 éve született Fazekas Mihály, a Lúdas Matyi neves írója. E fő művén kívül még rengeteg dolgot véghez vitt az életében. Tudták, hogy verseket írt vagy botanikus volt? Azért választottam ezt az életművet, mivel nagyon sokan nem ismerik ezt a nagyszerű botanikust, akinek elég sokat köszönhet a botanika, és engem is nagyon érdekel a biológia.*

**D**ebrecenben született 1766. január 6-án. Ósei elszegényedett katonanemesek voltak. Édesapja állatorvos és gyógykovács (iparos és fogász) volt egyszerre. A debreceni kollégiumba járt, és már ott elkezdte érdekelni az irodalom és a természettudományok (de attól még nem volt jó tanuló). Mivel konfliktusa volt több tanárral és diáktársaival is, a katonaeletet pedig nagyon érdekesnek találta, úgy döntött, hogy mindössze 16 évesen bevonul katonának (huszárnak). Mivel nem volt nemesi származású, nem tisztként kezdett a rangsorban, hanem közlegényként. Később még elég sokáig altiszt volt, majd mintegy hétvényi szolgálat után hadnagy, kis idő után pedig főhadnagy lett belőle. Miután egyre magasabb lett a rangja a hadseregben, elkezdte látni a háborúzás kegyetlenségét, fölöslegességét és további hátulütőit (sőt kezdett együttérzeni az ellenfelekkel), világképe egyre tágabb lesz, felvilágosulttá vált, viszont szinte „erőltetett menetként” folytatta a katonáskodást, az új eszméivel együtt.

Ezalatt két fontos szerelem történt az életében. Az első akkor, amikor Romániában táboroztak, és beleszeretett egy helyi, moldvai parasztlányba, Ruzsandába, de a kapcsolatnak vége szakadt, mivel a katonai állomásukat áthelyezték máshová. Későbbi francia szerelmével, Amelie-vel is megszakadt a kapcsolata ugyanilyen módon, mivel tovább kellett menniük. Ezek az elvesztett szerelmek a jövőbeni szerelmi költészetét nagyban inspirálták és befolyásolták.

1796-ban lemondott a főhadnagyi tiszt-



Fazekas Mihály portréja

ségről, és még ebben az évben hazatért Debrecenbe. Tehát nyugalmazott főhadnagyként visszavonultan élt, saját területén gazdálkodott, kertészkedett. Eközben összeharátkozott Csokonai Vitéz Mihállyal, költőtársával és Földi János állatorvossal. Ők mindketten ösztönzően hatottak költői énjére, így elég sok verse született abban a korszakban.

Mivel neki is meg kellett élnie valamiből, városi és kollégiumi hivatalnokként pénztároskodott. Telt az idő, eközben megírta a Lúdas Matyit, ami nagy siker lett.

Különösen imádta a botanikát, és a saját gazdaságát is folyamatosan bővítette, törődött vele, így sógorával, Diószegi Sámuellel együtt megírták a Magyar Fűvészkönyvet. Eddig ilyen növényhatározó és rendszerező könyv nem létezett

Magyarországon, alapokat állítottak Carl Linné növényrendszerezési művének ezzel a kötettel. A tudományos körökben igen fontos kötétté vált, de a gazdák furcsának találták, hogy egy könyv alapján gazdálkodjanak.

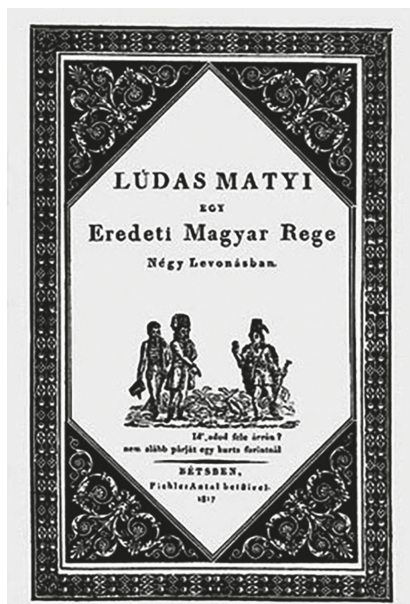
Később tovább folytatta megfigyeléseit és sógorával előkészítette a debreceni Fűvészkert terveit is, de a megnyitását már nem érthették meg. A debreceni körnek is a tagja volt, csakúgy, mint Csokonai Vitéz Mihály, aki szinte mindennapos vendég volt Fazekas házában, és Kazinczy Ferencsel is barátságban állt. Miután Csokonai elhunyt, Kazinczy Csokonai munkáinak kiadásánál Fazekast választotta maga mellé szerkesztőtársnak. Ebből kifolyólag kettejük között konfliktushelyzet alakult ki.

A debreceni közösség megbecsült tagja volt, így rábízta, hogy felügyelje a Nagytemplom újjáépítési munkáit is. Mivel Csokonai már korábban elhunyt, ezért magányosan tengette napjait, elég sok ideje volt. Így megszervezte a „polgári katonaságot”. Ez egy afféle rendfenntartó egység volt, melynek ő volt a parancsnoka. Rengeteg, katonáskodásból eredő fájdalmi lettek időskorára, ehhez még gyomorhaj is társult. Végül 1828-ban Debrecenben hunyt el tüdőbajban.

### Költészete

Költészetéből legtöbben a Lúdas Matyit ismerik, de nem csak ez az egy műve volt jelentős. Már a debreceni kollégiumi éveiben is elkezdett érdeklődni a humán- és reálta-





Legismertebb irodalmi műve,  
a Lúdas Matyi

dományok iránt. Csokonaival együtt indították el a kulturális életet Debrecenben. Legkorábbi költeményeiben a katonaelet milyenségét fogalmazza meg a humanizmus jellemző stílusában. Ezek „A Felette hatalmas...”, és a „Rajta vitéz!” című versekben is visszaköszönnek. Érdekesség, hogy az említett versekben még arról ír, hogy milyen „izgalmas” a török elleni harc. Későbbi, még mindig katonaelet alatt írt verseiben már szinte pacifistaként a háború borzalmairól írt, például az „Egy véres ütközet estvéjén” serkent gondolatok és az „Egy férje elestén könyörgő özvegy” című versekben.

További versei katonaeletében a szerelmi költemények voltak. Az említett verseket Ruzsanda, a román parasztlány és Amelie, a francia szerelme, emléke, az általuk okozott szerelmi bánata ihlette. Ezeket a verseket, főleg név szerint, valamelyik lánynak címezte. Például a „A Ruzsanda, moldvai szép”, „Az öröm tündérsége”, „Mint mikor a nap” és „Végbúcsú Amelitől” versek. A szóban forgó versekben fontos a természetesség és a közvetlenség.

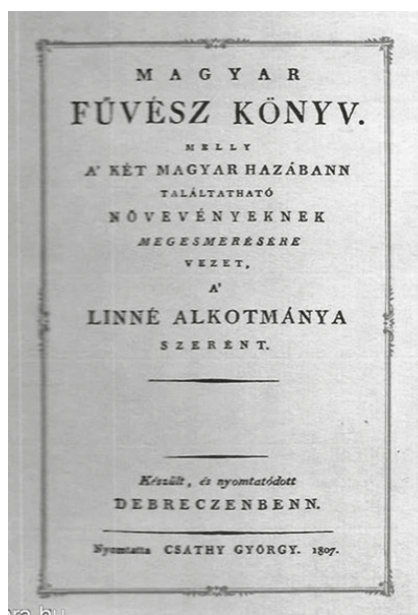
Azt követően, hogy leszerelt, a költészetének a jellege is átformálódott. Belevágott a természetlírák írásába. Verseiben a természet sokféleségéről, az évszakok változásáról írt. Ebben a témában íródott versei nagyon fontosak lettek a magyar természetlírában. Írásaiban felfedezhető a népiesség, a Berzsenyiéhez hasonló ódai hang és még valami természetes könnyedség is. A népies stílusát nyíltan vállalta, sőt még írt egy költeményt is ennek érdekében. Ez volt „Az én poézisom” című műve. Csokonai halá-

la után nem sokat írt, de az azután keletkezett verseiben felfedezhetőek a felvilágosodás eszméi is. Sosem akarta összegyűjteni saját költői életművét, ezért, miután elhunyt, elég kevesen ismerték a saját kortársai közül.

## Művei

A legfontosabb műve tudományos szempontból a *Magyar Fűvész Könyv* volt. Ezt Diószegi Sámuellel (sógorával) közösen írta 1807-ben. Azután 1813-ban megírta az Orvosi fűveszkönyv mint a magyar fűveszkönyv praktikai része című művét. Ez a két mű hozta létre a magyar botanika alapjait, és a növények elnevezéséhez szintúgy felhasználta a növények népies nevét, mint a kinézetének leírásából született kifejezéseket. Mindezek után megírta a Lúdas Matyit, amit először 1815-ben a szerző tudomása nélkül adtak ki Bécsben. A történetet már 1804-ben megírta, de mivel Kazinczy kifejezte a nemtetszését a művel kapcsolatban, ezért Fazekas Mihály nem akarta kiadni. 1817-ben megjelentetett egy javított, most már „szándékos” kiadást, és az ebből befolyó összeget a kiadó az akkor történt szombathelyi és körmendi tüzesetben károsultaknak ajánlotta fel. Mindezekon túl még megjelentek versei a halála után, és a levelezések Fazekas és Kazinczy között.

## Diószegi Sámuellel írt műve, a Magyar Fűvész Könyv



## Botanikai munkássága

A botanika a növényekkel foglalkozó tudományág. Fazekas Mihály már gyermekkorától nagyon szerette a reál tudományokat. Miután visszavonult a katonaságtól, egyszerű, csöndes életet élt Debrecenben. Eközben elkezdett behatóbban foglalkozni a növénytermesztéssel, növénygondozással. Ezeket később hatékonyabbá akarta tenni, s miután sikerült, botanikus sógorával megírta a



A Debreceni Egyetem Botanikus Kertjének bejárata

Magyar Fűvész Könyvet. A fűveszkönyv a növények orvosi és/vagy konyhai felhasználhatóságáról szóló könyv. Ez a könyv igen nagy sikereket ért el a tudományos berkekben, a gazdák viszont idegenkedtek attól, hogy egy könyv alapján vessenek-arassanak. A későbbiekben Diószegi Sámuellel megalapította a Debreceni Fűveszkertet, amelyben precíz leírták az ültetendő növények környezeti igényeit, megtervezték a növények pontos ültetési helyét, továbbá a növények ajánlott ápolását. Ez a munka abban a korban is nagy képzőerőt, pontosságot, előrelátó gondolkodást és mély botanikai ismereteket igényelt.

Méltán lehetünk erre a munkájukra büszkék mi is, hiszen ilyen fűveszkertek Európa többi országában is az idő tájt létesültek, követve az előkelő úri kastélyok, várak kertjeinek stílusát.

## A debreceni fűveszkert

A debreceni volt az első fűveszkert Magyarországon, s immár több mint 219 éves múltra tekint vissza. Kezdetben egy korabeli neve alapján „Pap taván” létrehozott kert volt, mely a városi Református Kollégium fennhatósága alatt állt és a természettudományos képzést segítette. A kert, mivel az időközben megalakult tudományegyetem elköltözött, megszünt létezni. Az új kert létesítésére Debrecen város 17 hektár terü-



tet adományozott, s 1928-ban alapították meg. Az 1933 és 1935 közötti időszakban rendszerezték a növényeket, kialakították az utakat, vízvezeték-hálózatot hoztak létre, és sziklakertet létesítettek. Ezek révén egyre több bemutatható növény lett a kertben. Növényföldrajzi csoportokat is telepítettek, például szikes, homokbucka, mocsár, tó. Emellett még felépült az első üvegház és egy betonozott aljú tó is. A II. világháború alatt lerombolták a kertet, és 1947-ben kezdték el az újjáépítést. 1949-ben már rengeteg (kb. 1400) növényfaj volt megtalálható itt, és 285 növény magjait kínálták cserére is. Nem sokkal ezután felépült három üvegház, ezáltal még jobban növekedett a kert és az ott élő növényfajok száma. 1975-ben új pálmaházat adtak át, melynek még a talaja is fűthető volt. Ezzel a pálmaházzal lehetővé vált egy igen sokszínű trópusi növénygyűjtemény létrehozása (melyben még



Fazekas és Diószegi szobra  
a botanikus kertben


#### A több száz éves kocsnys tölgy



a banán is képes beérni). Jelenleg a növényfajok száma meghaladja az ötezetet. Közülük szabadföldi faj: 1500, trópusi: 2000, egyéb pozsgás: 1000 faj, kaktusz: 1300 faj. A mai napig a tónál sövényvel körbevett pihenőtér közepén áll a két híres botanikus és az első magyar fűvészkönyv szerzője: Diószegi Sámuel és Fazekas Mihály emlékműve. A szobor mögött látható a kert több száz éves kocsnys tölgye, a Nagyerdő emlékét idé-

zi. A sétány mellett szárazságot jól tűrő homokbuckák láthatók jellegzetes növényekkel. Az aszfaltozott sétány végén feltűnik az üvegházcsoport, de még előtte, a bejáratnál az üvegház körüli sziklakertet és a gyöngyvirágos tölgyest is megcsodálhatjuk.

#### Zárszó

Remélem, hogy aki eddig nem ismerte jobban Fazekas Mihályt, most rengeteg új információval gazdagodott, míg ezt a pályamunkát olvasta. Én magam is nagyon sokat tanultam, miközben megírtam ezt a dolgozatot. Szerintem a tanulásnak nagyon jó formája, hogy a tanuló kutat az adott témában. Köszönetet mondok Törökkné Török Ildikó tanárnőnek, aki segített a téma kiválasztásában és az esszé megírásában, szerkesztésében is. 

#### Irodalom

Internetes források:

[https://hu.wikipedia.org/wiki/Fazekas\\_Mih%C3%A1ly](https://hu.wikipedia.org/wiki/Fazekas_Mih%C3%A1ly)  
<http://mek.oszk.hu/01100/01149/html/fazekas.htm>  
<http://erttsegi.com/tetelek/irodalom/fazekas-mihaly-elete/>  
<http://www.doksi.hu/faces.php?order=DisplayFace&id=13>  
[http://magyarhirlap.hu/cikk/45927/Fazekas\\_Mihaly\\_az\\_iro\\_es\\_botanikus](http://magyarhirlap.hu/cikk/45927/Fazekas_Mihaly_az_iro_es_botanikus)  
[http://botkert.unideb.hu/index.php?option=com\\_content&view=article&id=21&Itemid=93](http://botkert.unideb.hu/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=93)  
<http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/magyar-nyelvis-irodalom/irodalom/irodalom-6-osztaly/eletrajz/fazekas-mihaly-es-a-botanika>  
<http://www.mtva.hu/en/sajto-es-fotoarchivum/3835-fazekas-mihaly-koelto-botanikus-185-eve-hunyt-el>

## Hol „tartunk”?

BÓR DORINA – KOCSIS ÁBEL  
Széchenyi István Gimnázium, Sopron



Pályázatom ötletét a Magyar Tudományos Akadémia székházában levő nagyteremnek köszönhetem, ahol kariatidák, vagyis oszlopként alkalmazott női szobrok tartják a mennyezetet. Ezen hölgyek testtartása mindenképpen optimális – gondolkodtam a Természet Világa diákpályázat előző évi díjkiosztó ünnepsége során –, hiszen ekkora súly még olimpiai bajnokainknak is komolyan feladná a leckét. Vajon a mai tizenévesek milyen kariatidák lennének? Megfelelne-e testtartásuk a szerephez? A sport segíthet az egészséges és erős gerincoszlop kialakulásában? Ilyen és ehhez hasonló kérdések vetődtek fel bennem, amelyek egy felkiáltást vontak maguk után: derítsük ki!

Akárcsak tavaly, idén is a programozásban jártas *Kocsis Ábel* segítségét kértem egy számítógépes mérés megtervezésében, lebonyolításában. Az általa írt programmal a gerinc formáját tudtuk nyomon követni, kirajzoltatni, és megnézni, hogy az ideálisnak tekinthető alaktól hogyan tér el.

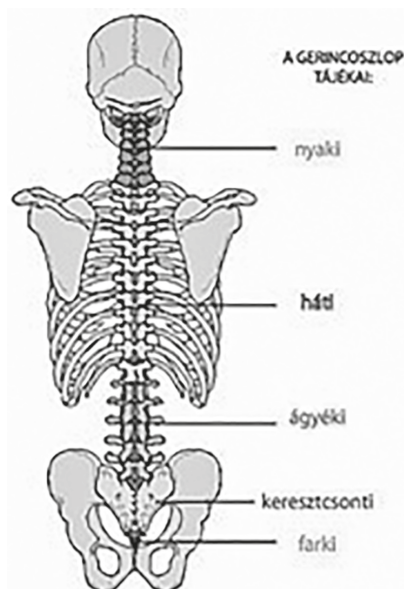
#### Fáj a hátam, fáj a hátunk...

Tizenéves korunkban mi is és bizonyára az olvasók közül is sokan hallották vagy éppen hallják szüleinktől/szüleiktől a „Húzd ki magad fiam!” vagy „Úgy görbülsz a fölött a könyv felett, mint egy kérdőjel, édes gyerme-





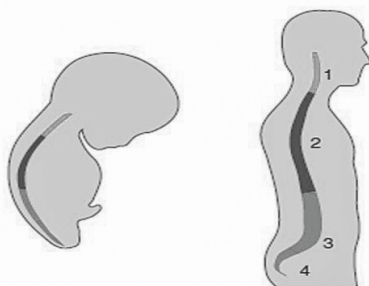
kem!” kifakadásokat. Az első háti fájdalmak megjelenésével fel kellett ismernünk, hogy a pusztá jóindulat beszélt belőlük. Sajnos napjainkban nem Ábel és én vagyunk az egyetlenek, akik hasonló panaszokkal szembesülünk. Annak szeretünk volna utánajárni, hogy mennyire komoly a helyzet.



Ahhoz, hogy megérthessük a problémát, először tisztáznunk kell, hogy tudományosan – mind biológiailag, mind fizikailag – mi állhat a háttérben.

### A gerincoszlopról, testünk központi támasztóeleméről

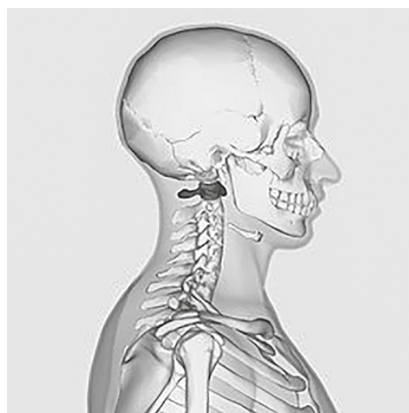
A gerinc testünk vázrendszerének és az idegrendszernek is olyan fontos eleme, hogy sérülékenysége mindenképpen említésre méltó. Azonban először ismételjük át röviden a biológiaórán hallottakat! A gerincoszlopot huszonnégy különálló csigolya építi fel, amelyek nyaki (7 darab), háti (12) és ágyéki (5) szakaszokra tagolódnak. Ezek alatt helyezkedik el az öt csigolyából összezsontosodott keresztcsont és végül a farkcsont, amit 3–5 csigolya épít fel. A szakaszokat a későbbiekben alaposabban is megvizsgáljuk, különös tekintettel a rájuk jellemző rendellenességekre.



A csigolyák belsejében, a csigolyalyukak által képzett csatornában helyezkedik el a gerincvelő, másik nevén a központi idegrendszer. Feladata, hogy a test minden pontjából továbbítsa a szükséges információt az agyba és viszont.

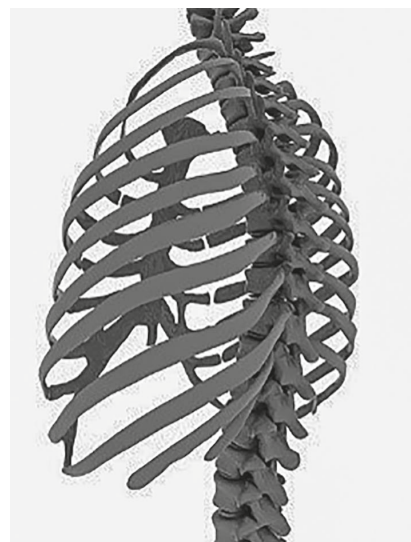
A gerinc mentén négy nagy görbületet különítünk el, amelyek kialakulása azzal kezdődik, hogy a kisgyerek emelgeti a fejét, majd feláll és elindul. A csecsemőknél csak egyetlen ív figyelhető meg, ez alakul át a következőképpen: a legfelső (1) szakasz a nyaki homorulat (lordosis); a legnagyobb (2) szakasz a háti domborulat (kyphosis); alatta (3) az ágyéki homorulat (lumbalis) és a legrövidebb (4), de leghosszabb nevű keresztcsonti domborulat (sacrocaudal kyphosis). A szemléletes elnevezéseket pergamoni Galénosz görög orvosnak köszönhetjük, aki már az ókorban tisztában volt a gerinc görbületével. λόρδωσις ugyanis görögül gödrt jelent, a κύφωσις pedig púpot.

Talán kevésbé ismertek a gerinc menti tartóizmok, amelyek az ínszalagokkal karöltve szintén a támasztás jelentős kellekei.



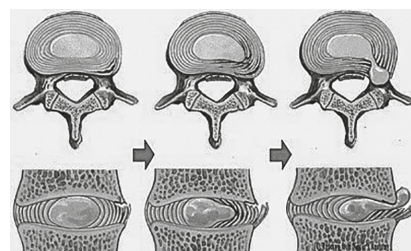
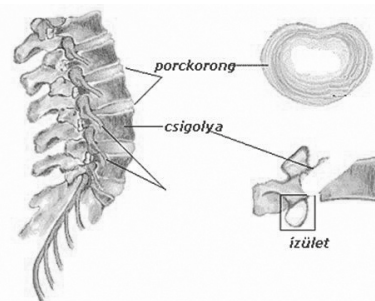
Feladatuk, hogy kontrollálják a mozgást vagy éppen a nem mozgást tevékenységek végzése, illetve a pihenés során.

Ezen izmok két rétegben húzódnak. A mélyizmok a csigolyák nyúlványai közötti teret töltik ki, és egymással szorosan összekapcsolódva húzódnak végig a nyaki szakasztól az ágyéki szakasz végéig. A felületesebb izmok talán jobban ismertek. Közéjük tartozik pl. a csuk-



lyásizom, a széles hátizom. Feladatuk sokkal inkább a tudatos mozgás végrehajtásához kapcsolódik.

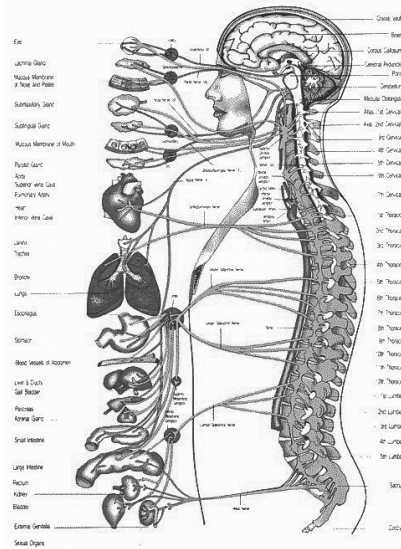
A nyaki szakaszon található az atlas (=fejgyám) és az axis, amelyek nem valódi csigolyák, inkább kapcsolóelemként funkcionálnak a koponya és a gerincoszlop között. A csatlakozási pontjuk rendkívül sérülékeny.



A háti szakaszon a csigolyák elkezdnek bordákat „növeszteni”, előlről pedig a belső szervek nyújtanak védelmet nekik, tehát itt nem olyan nagy a sérülés kockázata.

Az ágyéki szakaszon a védelem szintén kisebb, a feladat oroslánrésze a mélyizmoké, valamint az alsó hasizmoké, amelyek erősítése nem szokványos gyakorlatokkal történik, ezért aztán nem fordítunk elég energiát rájuk.

A keresztcsonti és farkcsonti rész mélyen a szövetekbe ágyazva helyezkedik el,



sérülésük valószínűsége elég kicsi, amiben az összeesontosodás is segít. Persze ettől még fájdalmas tud lenni a korcsolyázás közbeni nadrágfék.

Az elmondottakból láthatjuk, hogy az elváltozás esélye a nyaki, illetve az ágyéki szakaszon a legnagyobb.

A gerinc a csigolyák szoros, porckorongok általi kapcsolódásának eredményeképpen ilyen rugalmas. A korongok üvegporc-ból vannak, és nagy mennyiségben tartalmaznak enyvadó rostokat. Ezek termelik azt az anyagot, ami kitölti a csigolyák közötti teret, ezáltal távol tartja egymástól azokat. Az a folyadékmennyiség, ami a napi mozgás során eltávozott, éjjelente pótlódik. Ez az oka annak, hogy reggelente egy-két centiméterrel magasabbnak mérjük magunkat, mint este. A folyadék időskorban nem termelődik újra ugyanolyan mértékben, a szervezet ezáltal kevésbé lesz hidratált, megnő pl. a csigolyák ütközésének kockázata.

A csigolyákat körbefonja a rostos gyűrű, amelynek alakja könnyen változik ugyan, de gyakori vagy nagy igénybevétel esetén rugalmasságát elveszti és meglazul, ami sérvesedéshez vezethet.

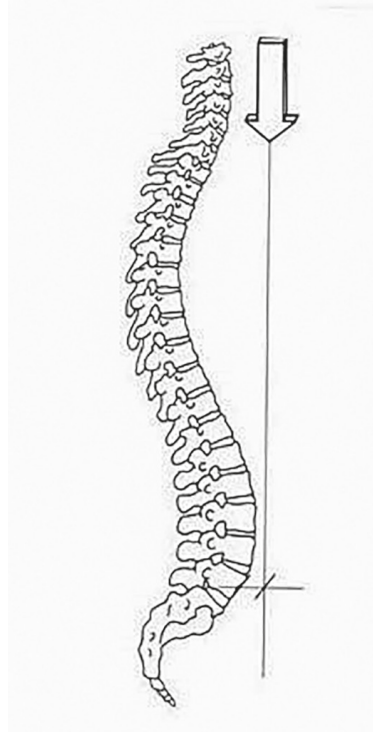
Ez azt jelenti, hogy kitüremkedés jön létre, az pedig nyomhatja a központi idegrendszert az adott helyen, és ez sokszor egy másik szerv panaszait okozza. Például az ágyéki szakasz deformitásakor gyakoriak a vesepanaszok, a nyaki szakaszon jelentkező probléma pedig érzékszervi panaszokat okozhat.

### A testtartás és gerincproblémák biomechanikai szempontból

A biológiai összefoglaló után most tekintsük át a gerincoszlop és csigolyák viselkedését a külső terhelő erők szempontjából. Mivel méréseinket is álló testhelyzetben végeztük, így elsősorban ebben a pozícióban vizsgáljuk az erőket is.

Maga a gerinc a függőleges terhelés hatására az említett rugalmasságának köszönhetően úgy viselkedik, mint az autók lengéscsillapítója. Természetes állapotban a gerincre hat a gravitáció, azaz tartania kell a testsúlyból adódó terhet. Ellenerőként több izomszortól (pl. mélyizmok és felületese hátizmok=antigravitációs izmok; hasizmok) közösen származó tartóerő lép fel.

A folyamat pontosabb megértéséhez szükséges, hogy a gerincet további részekre bontsuk. Most azonban a csigolyák csatlakozása a hangsúlyos, tehát úgynevezett funkcionális szegmentális egységekre van



szükségünk. Ezek két csigolyát, a köztük lévő porckorongot, inzalagokat és a kapcsolódó izmokat foglalják magukba.

A gerincen belül a sagittális síkban, vagyis a görbületekkel párhuzamosan három oszlopot különíthetünk el. Az elsőben a csigolyatestek, a másodikban a gerinc-



csatorna, a harmadikban pedig a nagy csigolyanyúlványok és kisizületek találhatók. Általában a függőleges irányú terhelés



80%-a az első oszlopra hárul, így a hátsó részen a csigolyák eltávolodnának egymástól. Ezt a szalagok feszsége kompenzálja. A rendszer egészséges működéséhez fontos tehát az előfeszítettség. Gyakran ennek a hiánya vezet a csigolyák elmozdulásához. A nyíróerők által okozott x, y és z irányú elmozdulások (rendre a, c és b ábra) és legtöbbször erőpárok által okozott elfordulások az x, y és z tengely körül (rendre d, f és e).

### A gerincproblémák okai

Sajnos nem csak a gravitációból származó terhek hárulnak gerincünkre. Az akceleráció következtében tinédzserkorban a gyerekek hirtelen nagyot nőnek. Ilyen mértékű változást a vázrendszerben még a megerősített izomzat sem képes követni. A serdülőkorban lévő szervezetet emellett lelki dülttség jellemzi a fokozott hormontermelődés miatt, ehhez járul még hozzá a környezet,



pl. iskola által okozott stressz, amely a tinédzserek testtartásának változásában is megnyilvánul – kialakul az úgynevezett hanyag tartás. Sokan gimnáziumba kerüléskor a rendszeres sportot is abbahagyják, hogy több idejük maradjon a tanulásra. Ezeket a körülményeket együttesen akár gerincprobléma-alapsomagnak is nevezhetnénk.

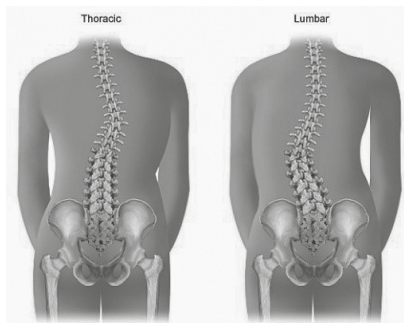
A személyi számítógépek megjelenése újabb „esélyt” adott arra, hogy tovább romboljuk gerincünk egészségét mindennapjaink során. Ha végiggondoljuk napi rutinunkat, észrevehetjük, hogy aktív óráink jelentős hányadát az állás és fekvés közötti átmeneti testtartásban töltjük, legtöbbször ülve. Ez a gyerekek, tizenévesek helyzetében sincs másképp, súlyosbító körülmény azonban, hogy az ő testük még a fejlődés, stabilizálódás szakaszában van. De mi a baj az ülésel? Az egyik, hogy ilyenkor a terhelés a gerincen „csattan”,



hiszen útja – a görnyedt háton át – az ülőgumókban végződik. Kivételt képez az úgynevezett térdelőszék. Az ülés másik negatívuma a mozgáshiány, ami – többek között a gerinc menti – izmok leépüléséhez, szélsőséges esetben sorvadásához vezet.

### A leggyakoribb gerincproblémák

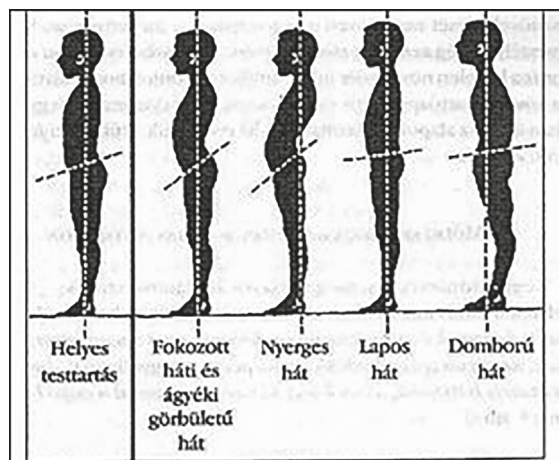
A fiataloknál legsűrűbben a gerincferdülés jelentkezik. Két altípusát különböztetjük meg aszerint, hogy a görbületekkel párhuzamosan vagy azokra merőlegesen történik-e deformitás. Előbbi esetben négy különböző gerincformát különíthetünk el. Fontos megemlíteni, hogy a görbületi elváltozások sosem „járnak



néven fűzővel történik. Ennek viselése elég kényelmetlen, sőt a nap 23 órájában kellene hordani, ezért sajnos a tizenévesek hajlamosak inkább a fájó hátat választani.

A szakértők szerint mára már minden másodiknál idősebb gyermeknek kezdetlegesen kialakult a domború hát jelensége és a hanyag tartás.

Miután a problémákat megismertük, térjünk át a fiatalkori gerincbetegségek gyógyítására, a megelőzés lehetőségeire. Ennek egy jól bevált módja lehetne az oktatás, informálás. Ha minden gyerek 10–12 éves korában pontosan tudatában lenne gerince állapotával, esetleges problémájával, valamint ismerné a gyakorlatokat, amelyekkel

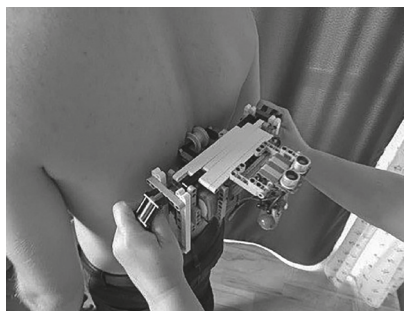


egyedül”. Az emberi test egyensúlyának feltevése, hogy a fej mindig a gerincoszlop ép csigolyái által meghatározott tengelyen helyezkedjen el. Ennek következtében a fellépő deformitást egy másik szakaszon ellentétes értelmű elváltozás kompenzálja. Pl. a háti szakaszon fellépő jobbra konvex hibát egy ágyéki szakaszon lévő balra konvex kíséri.

#### Típusai:

- *Banánhát* esetén a háti és az ágyéki görbület nagysága fokozódik, olyan, mintha az illető túlságosan is kihúzná magát.
- *Nyerges hát* esetén kezdetben az ágyéki szakasz deformálódik előre-felé, majd ezt kompenzálja a nyaki és háti szakasz hátragörbülése. Könnyű észlelni, mert az alhas előreesik.
- *Lapos hát* esetén a görbületek nagysága nem elégséges, az egész test nagyobb feszültségnek van kitéve. Tünete a túlzottan egyenes háti szakasz.
- *Domború hát* esetén pedig a háti görbület válik erőteljessé, púmpa nő az egyénnek.

A helyzet sokkal súlyosabb, ha a deformitás oldalirányban történik. Ezt nevezzük skoliosisnak. Gyógyítása 20°-os csigolyaeltolás esetén skorzettel, vagy ismertebb



gyógyíthatja magát, a későbbi problémák nagy valószínűséggel megelőzhetőek volnának. A legtöbb (visszafordítható) probléma lányoknál általában az első menstruációig, fiúknál pedig átlagosan 17–20 éves korig tökéletesen gyógyítható. Ezután már csak szinten tartás lehetséges. Utóbbi sem elhanyagolható, mert sokszor megelőzhető vele a műtét.

### Mennyire görbülök?

Ha erre a kérdésre a gyerekek időben megkapják a választ, akkor egy kis odafigyeléssel, rendszeres gyakorlatokkal helyre lehet hozni a gerinc elváltozását. Jó példa erre Ábel, aki viszonylag korán, 12–13 éves korában nyúlt nagyot. Akkoriban egy

kicsit meggörbült a háta, azonban figyelte, hogy kihúzza magát, és most, 18 évesen nyoma sincs a hanyag tartásnak.

A válasz egyszerű, de látványos módon szemléltetjük egy giroszenzor, egy ultrahang-szenzor, a National Instruments myRIO nevű eszköze és Labview programnyelve segítségével. Műszerünk – a továbbiakban toli – egy kiskocsira hasonlít leginkább, hiszen két kereke van, amelyek a toli szimmetriatengelyén helyezkednek el. Szerepük az, hogy végigvezessék a tolit a gerinc mentén. Az elnevezésből sejthető is a mérés menete: a vizsgáló személy egyszerűen végigtolja az eszközt a delikvens hátán. Ez akár masszázsnak is tekinthető, amire valószínűleg kaphatóak a gyerekek; és nem kell röntgenre vagy MR-re várakozni, illetve felesleges sugárzást begyűjteni.

A tolin foglal helyet a giroszenzor. Ez az érzékelő manapság már minden okostelefonban megtalálható, de gyakran keverik össze a gyorsulásmérővel, amit G-szenzornak is neveznek. A kettő között az a különbség, hogy a giroszenzor a forgásokra érzékeny, és egy adott helyzettől (pl. esetünkben a függőlegestől) való eltérés-elfordulás szögét adja meg. Ez teszi lehetővé pl. azt a funkciót, hogy az okostelefon döntögetésével görgecsünk egy oldalon. Mi pedig kihasználjuk, hogy ha egy görbe mentén mozgatjuk, akkor a szenzor által mért szögértékből vissza tudunk következtetni az ívré.

Célunk tehát a következő: az axistól, mint kiindulási ponttól kezdve, a távolság függvényében kirajzoltatni a giroszenzor által a függőleges z tengelytől mért elfordulást. Ez az elfordulás két fő irányban mehet végbe. Az x irányú eltérések a skoliosist mutatják

Az első tervek szerint a giroszenzor egy panelen foglalt volna helyet, és azt erősítettük volna a toli. Mivel ezen a panelen kilenc kivezetés van, kilenc drót tekergőzne a vizsgált személy körül. Akár szerencsésnek is mondhatjuk azt a fordulatot, hogy ez a megoldás nem akart működni, a myRIO-ba viszont be van építve egy giroszenzor.

### MyRio és a varázsló

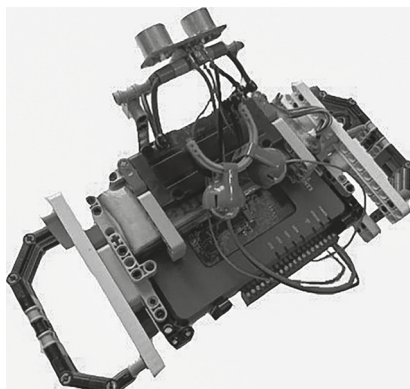
A varázsló természetesen Ábel, aki megszelídítette ezt az eszközt is. Tavalyi pályázatunkban a myDAQ nevű közvetítőt használtuk, amely a szenzorok (bemene-tek), illetve motorok, LEDEK (kimenetek), valamint a számítógép között létesít kapcsolatot. Az új változat működési elve más, a myRIO magában egy kis komputer.

Míg az első esetben számítógép nélkül nem tudtuk a megírt programot végrehajtani, addig most magán a myRIO-n fut a számítógépen előzőleg megírt és áttöltött program. Esetünkben a myRIO levelezési



a mérést, majd visszaadja a szót, hogy a mérési eredményeket a gép ábrázolja grafikonon, mivel maga megjelenítésre nem képes. Ez viszont az egyetlen „hiányossága”, egyébként routerként is üzemel, így bármilyen környezetben képes kommunikálni és adatokat küldeni a számítógépnek az általa generált wifin keresztül.

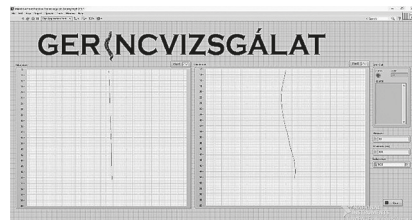
Ily módon egyetlen kábelre sincs szükségünk, ha magát a myRIO-t tologatjuk. Most már csak azt kell tudnunk, hogy éppen hol tartunk a tolvál, vagyis a függőleges tengelyen. Erre a feladatra egy ultrahang-szenzort rendszeresítettünk, ennek segítségével következtetünk arra, milyen messze járunk az asistól.



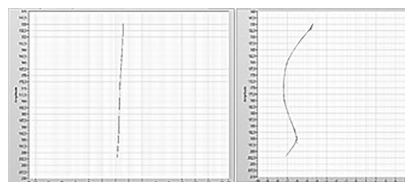
A myRIO-nak LEGO-ból készítettünk keretet, ezen foglal helyet az akkumulátor és az ultrahangszenzor is. Elhelyezésekor jutott eszünkbe az a probléma, hogy ennek az érzékelőnek mindig függőlegesen kell „néznie”, viszont a görbületekkel együtt az ő helyzete is változik. Azonban egy nehézkeggyel ellátott forgatható rész és a gravitáció ezt a kérdést is megoldja.

Miután elkészült az eszköz, következett a varázslat Ábel részéről. Persze ehhez több munkával töltött éjszakára is szükség volt, mert digitális kor ide vagy oda, a varázslatok most is időigényesek (vagy talán egyre inkább...). Ennek eredményeképpen megszületett a Labview nyelven írt program. Ez egy úgynevezett grafikus nyelv, azaz a program ikonokból és az azokat összekötő huzalokból épül fel. Kifejezetten arra a célra fejlesztették ki, hogy virtuális műszereket tudjunk vele létrehozni. A virtuális jelző arra utal, hogy nincs a kezünk-

ben hagyományos értelemben vett mérőeszköz, mint például egy digitális multiméter. A szoftver segítségével a mért fizikai mennyiségek időbeli változását is

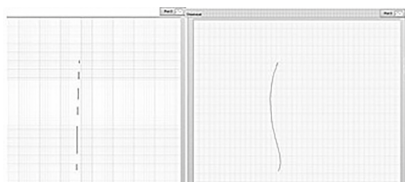


könnyen nyomon követhetjük egy grafikonon, akár mérés közben is. Ennek köszönhetően mi is rögtön láthatjuk, ahogy kirajzolódnak gerincünk görbületei a monitoron. Miután végigértünk az ágyéki csigolyákon (a mi vizsgálataink érthető okokból eddig tartanak), a Stop gombra kattintva a program készít egy képernyőképet.



Ezek közül mutatunk be itt néhányat:

Jócsi 184 cm magas, 18 éves, és kimutatott gerincferdülése van minden irányban. Ez volt az első sikeres próbálkozásunk! A grafikon függőleges tengelyén a plafontól



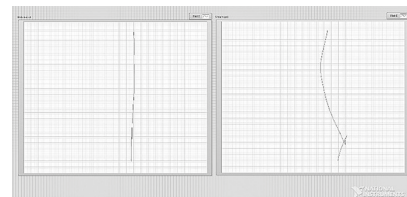
való távolság látható cm-ben. Ebből leolvasható az általunk vizsgált gerincszakasz hossza, ami jelenleg nem fontos információ, ezért a továbbiakban nem jelenítettük meg.

Adél 8 éves, 128 cm magas. Egy kicsit jobbra csapott válla van, de a görbületei olyanok, ahogy az a nagykönyvben megvan írva. Arra, hogy ez pontosan milyen, még visszatérünk.

Anna 16 éves, 150 cm magas. Érdekes lehet számunkra, hogy 8 éve hegedül.

A rajzolat szerint a háti és ágyéki csigolyák átmeneténél érdekes dolog „történik”. Valóban, a vizsgált személynél ez a hely egészen mélyen beugrik.

A mérésünkkel kapott alakzatokon az első esetben („hátról”) egyértelműen látszik a deformáció, a görbületnél („oldalról”) azonban már bonyolultabb a



helyzet. Vajon mi számít egészségesnek? Hol a határ a kóros elváltozás és a megfelelő kategória között? Az biztos, hogy az életben nincs ideális eset, csak egy sávot adhatunk meg, amelyen belül jónak tekinthetjük a gerinc alakját. Elvben úgy néz ki az egészséges gerinc, hogy az első és utolsó háti csigolya egy függőleges egyenesbe esik, az utolsó nyaki csigolya pedig éppen a keresztcsont felett kellene, hogy elhelyezkedjen.

Erre nézve végeztek egy 149 főre kiterjedő felmérést,<sup>1</sup> amelyek alapján megpróbálták szögek és görbuletekhez illeszkedő körök vizsgálatával matematikailag megadni a helyes gerincformát. Ezeknek a grafikonoknak a vízszintes tengelyén milliméterben mért távolság szerepel. Mi a vízszintes tengelyünkön az egységet tapasztalati úton választottuk meg, ami azért nem befolyásolja a későbbiek, mert a mi szempontunkból nem az abszolút eltérés a lényeges, hanem az összehasonlítás.

Az említett felmérés alanyai azonban pechünkre 30 évnél idősebbek voltak. A gyerekek, illetve fiatalok gerincére viszont nem ugyanaz érvényes, mint a felnőttekére. Ez azt jelenti, hogy magunknak kell létrehozni az összehasonlítás alapját. Terveink szerint a jövőben egészséges gerincű fiatalokon végzett mérések alapján készítjük el az „etalont”, vagy inkább „etalonokat”. A gerincszakaszok hossza ugyanis – főleg gyerekeknel – nagyon fontos szempont. Az összehasonlításnak úgy van értelme, ha pl. egy 41 cm-es gerincet egy közel ugyanakkorához, mondjuk 40 cm-eshez viszonyítunk.

A feladat és az eszköz tehát adott, a probléma pedig valóban mindennapos. Ábel néhány napja látott egy cikket az SMS-nyakról. Az elnevezés találó, ha magunk elé idézzük a kutyujukat leszegett fejfel nyomkodó fiatalokat. Ez a testtartás a nyaki csigolyákat terheli meg jelentősen. Rögtön meg is néztük kéznél lévő alanyainkon, hogyan görbül a hátuk SMS írása közben!

Jelenleg tehát itt tartunk a (test)tartásunkat illetően, és igyekeznünk kell, hogy el ne késsünk a megelőzéssel!

*Az írás szerzői diákpályázatunk Önálló kutatások, elméleti összegzések kategóriájában második díjat kaptak, és elnyerték a Metropolis kategória díját is.*

<sup>1</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3175922/>



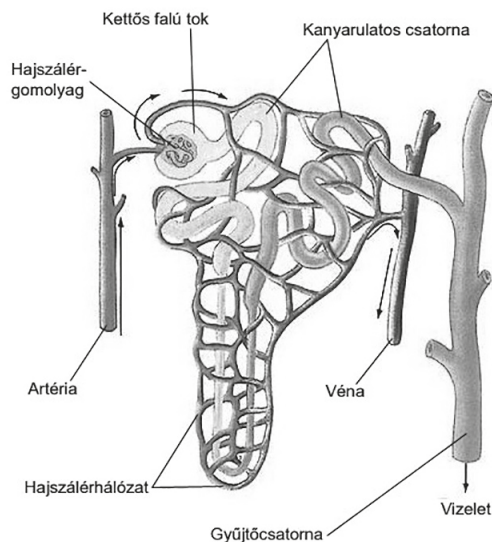
# Az emlősvese anatómiája, működésének fizikai modellezése

ABEBE ADRIENN

Csongrádi Batsányi János Gimnázium, Szakgimnázium és Kollégium

Az ember vizeletkiválasztó szervrendszerének felépítése viszonylag egyszerű. A vizeletet két vese képi, amelyek a hashártya mögött, a hasüreg hátsó oldalán, a gerincoszlop mellett találhatóak. Formájuk hasonlít egy babra.

Egy vese tömege 130–140 g, hosszúsága mintegy 12 cm. A vesét 3 tok veszi körül. A legbelső a veseállomány rostos tokja. A középső tok zsíros, védi a vesét, míg a vese külső része kevésbé sűrű és kötőszövetes lemez burkolja. A vese hosszanti metszetén jól látható a vesemedence. Ebben a rétegben kívül található a kéregállomány, amely egy vékony részt foglal magába, a belső rétegben pedig a velőállomány található. A velőállomány jellegzetes képződményei a vesepiramisok. A vesepiramisok száma kb.30.



## A vese elvezető csatornája és a hozzá kapcsolódó érhalózat

A vesemedencének azt a területét, ahol vér és nyirokerek lépnek be, vesekapunak nevezzük. Itt hagyja el a vesét a húgyvezető is, amely a hasüreg hátsó falán vezet a szeméremcsont mögött elhelyezkedő húgyhólyagba. Innen indul tovább a húgycső, amely a vizeletürítés utolsó szakaszát irányítja.

A vese működési alapegysége a nefron, amelyből több mint 1 millió található a vesében. Mindegyikbe egy, a vesébe lépő artériából eredő arteriola vezet, amelyek majd a helyben hajszálerekből álló gomolyagot, más néven glomerulust képeznek. Az arteriolát belépés előtt simaizomszövet veszik körül, amelyek renin nevű hormont termelnek. A renin a vérplazmában egy előanyagot „alakít ki”, amely valamennyi érterület ereit szűkíti és így

vérmomás-emelkedést hoz létre, ami a kiválasztó rendszer működésének az alapja. Ez a kezdeti szakasz a benne lévő érgomolyaggal együtt a Malpighi-féle test, az érgomolyagot körülvevő kettős hámréteg a Bowmann-tok. Az érfal és a Bowmann-tok belső hámla közötti hártán rések nem találhatóak. A Malpighi-test külső hámrétege hosszú csatornában folytatódik, amit tubulusnak nevezünk. A csatorna számos kanyarulatot vet, majd egyenes leszálló ággal a velőállományba vezet. Itt egy hajtúkanyart képez, és egyenesen a kéregállományba fut vissza. A hajtúkanyar neve Henle-kacs. A Henle-kacs (tubulus rectus) szoros kapcsolatban van az itt lévő arteriolákkal. A tubulus hátsó szakasza a gyűjtőcsatornába torkollik. A kéregből a veseállományba fut és a vesepiramisok csúcsán a vesemedencébe nyílik.

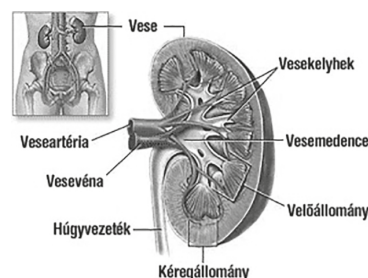
A vese munkája a vér szűrése, bomlástermékeinek kiválasztása, és ezáltal a vérplazma-alkotórészek állandó koncentrációjának fenntartása. A vesék vizeletkiválasztásában két szakaszt különíthetünk el. Az elsődleges vizelet kiválasztása, illetve a végleges vizelet kialakítása.

Az elsődleges vizelet a glomerulusok hajszálereiből ultraszűrés útján lép ki a Bowmann-tokba. Összetételében közel azonos a vérplazmával, csak nem tartalmaz fehérjét, hiszen a 4 nm-nél kisebb molekulák nem férnek át a pórusokon. Az ultraszűrés a glomerulus kapillárisokban uralkodó emelkedett vérmomás okozza. Az elsődleges és a végleges vizelet között jelentős koncentrációkülönbség van. A végleges vizelet a csatornarendszerben alakul ki azáltal, hogy a kanyarulat csatornában az elsődleges vizelet vízkomponensének 99%-a, továbbá cukor, Na- és Cl-ionok vissz

szaszívódnak a vese érrendszerébe. A Henle-kacsba az elsődleges szűrletnek csak a tizede jut át. A leszálló ága víz, még a felszálló ág az ionok számára átjárható. A glükóz még a kezdeti szakaszban szubsztrátok segítségével visszaszívódik, jobb esetben. Az ionösszetétel a nátrium- és a káliumionok cseréjével, a kalcium visszaszívásával módosulhat. Fontos a vér megfelelő kémhatása. E terület sejtjeinek hordozó molekulái az oxóniumionokat igény szerint cserélik ki nátriumionokra. A hormonoknak is fontos szerepe van a szűrletképzésben. Az agyalapi mirigy hátsó lebenyében tárolódó vazopresszin (ADH) a víz visszaszívását, a mellékvese kéregállományában keletkező adoszteron pedig a nátriumion vérbe juttatását serkenti.

A vizelet vizsgálata egyrészt fontos élet-tani folyamatokra derít fényt, másrészt számos betegség felismerésében elengedhetetlen. Táplálkozási, hőmérsékleti tényezőktől, a végzett munkától függően egészséges ember-nél is lehetnek ingadozások a vizelet mennyiségében és összetételében.

A vizelet általában szalmasárga színű. Napi mennyisége a folyadékfelvétel és a verejtékezés mértékének függvénye, általában kb. másfél liter, kémhatása savas. A csak növényi táplálékra élő emberek vizelete lúgossá válik. A normál vizelet összetétele: 95% víz, szerves anyagok, szerves anyagok, festékanyag, nem állandóan jelen lévő anyagok.



## A vese felépítése

A szerves anyagok a fehérje és nukleoproteid anyagcsere végtermékei. Legfontosabb közülük a karbamid, amely a szervezetben a fehérjék lebomlásának mértékétől függően napi 20–40 g mennyiségben választódik ki. Az izomanyagcsere során keletkező kreatinin mennyisége a vizeletben napi 1–2 g. Jelentős még a nukleoproteidok anyagcserejében salakanyaggá váló húgysav kiválasztása, valamint az éterkénssav és a foszforsav, amelyek a vizelet savas kémhatását adják. A szerves anyagok között a konyhasó mennyisége a legnagyobb (napi 15 g), kiválasztódnak még különböző anionok (szulfátok és foszfátok), a kationok közül a kálium, kalcium, nátrium, magnézium, illetve ezek sói. A vizelet színét a benne oldott sárga színű festék, az urokrom adja. Kiválasztódnak még különböző porfirinek és epefesték-származékok is.

A vesebetegségek felosztása: (1. fizikai behatások, 2. mérgezőek, 3. fertőzések, 4. érrendszeri zavarok, 5. anyagcsere-betegségek, 6. vesekő, 7. daganatok okozta elváltozások).

Valószínűleg immunmechanizmus révén alakul ki streptococcus-infekciót követően a kétoldali, nem bakteriális akut glomerulonefritis, amelyet albuminuria, hematuria, ödéma, oliguria, hipertónia és a vesefunkció romlása jellemez.

Következménye: veseelégtelenség és urémiához vezető krónikus glomerulonefritisz.

A nefrózis különböző okok miatt kialakult veseelváltozás, amelynek lényege, hogy a vizelettel történő nagyfokú fehér-



Elkészített metszetek a veséből

jevesztés hipoproteinaemiához és súlyos ödéma kialakulásához vezet. A vesefunkció kezdetben kielégítő, később nefrózis talaján krónikus nefritisz alakul ki.

A vese érrendszeri zavarai: a diasztolés vérnyomás gyors és tartós emelkedése a veseerek károsodásával vesezsugorodáshoz és hipertónia maligna kialakulásához vezet, amely leggyakrabban a hipertónia rosszindulatú formája.

Az anyagcsere-betegségek zömmel öröklöttek.

Vesekő képződésére hajlamosít a koncentrált, túltelített vizelet, vizelet pangás, fertőzés, étrendi és anyagcserezavarok. A vesekövek kalcium-foszfátból, kalcium-oxalátból, kalcium-karbonátból, húgysavból és ammónium-urátból, ritkán cisztinből és xantinből állnak. A üréterbe jutott és elzáródást okozó kö hirtelen görcsös fájdalommal járó vesekő-kólikát okoz. A fájdalom kisugárzik a hólyagba, húgycsőbe, nemi szervekbe. A roham oldódása után ürített vizelet gyakran véres.

A daganatok közül a jóindulatúak többnyire ritkák és pansztemesek. A rosszindulatúak közül érdemes megemlíteni: hipernefróma (Grawitz-tumor), policisztás vese, ami a vesecsatornácskák üregeket alkotó tágulatával jár, mindig kétoldali, rossz prognózisú, öröklődő.

### Laboratóriumi kísérletek

A vese boncolása során egy madár veséjét vizsgáltuk meg, amely szintén utóvese típusú, csakúgy, mint az ember veséje. Természetesen méretbeli különbségek vannak. A megfigyelés céljai, hogy a vese anatómiai elhelyezkedését megfigyeljük, szöveti metszetét elkészítsük, modellezzük.

Első lépésben a vesét kellett megkülönböztetni a szervektől, ami nem olyan egyszerű, mint egy tankönyvi ábra. Miután sikeresen teljesítettük az el-

ső lépést, következett a vese eltávolítása a többi szervtől. Különösen élvezetes pillanat az orvoslás szerelmeseinek, hiszen úgy érzi magát az ember, mintha egy mini élőlényen végezné élete első beavatkozását. Ezt a bonckészlet által tartalmazott szikével és csipeszszel hajtottuk végre. A „mütét” végén a két vesetestet egy üveglapra helyeztük, amelyen megfelelően el lehetett végezni a metszet készítést. A kéreg-, illetve velőállományról készítemet metszetet, amelyet egy fénymikroszkóp segítségével megvizsgáltam különböző Nagytáblákon. Erről egy Motic nevű programmal digitális képet is készíteni lehetett, megörökítve az alkotást. Természetesen a boncolás szabályainak megfelelő eszközökkel és higiéniai háttérrel végeztük a kísérletet.

A vese fizikai modellezése során a modell összeállításához nagyon sok eszközt használtunk: 1 állványtálcát, 2 csúszószorítót, 1 hosszabb állványt, 1 rövidebb állványt, 1 szilikoncső, 1 kicsi L-alakú üvegcső, papírvatta, ételfesték, 1 kicsi főzőpohár, lufi, befőttes gumi, szűrőpapír, 1 kicsi kettősdió, vegyszeres kanál volt szükséges.

Ezek által a nefron működését tudtuk megvizsgálni, amely során a vérből szűrlet lesz. A megadott eszközök segítségével összeállítottuk a nefron modelljét. A főzőpohárba ételfesték és víz segítségével művért állítottunk elő. A megfelelő helyre rögzített és szűrőpapírral bélelt pohárba beleöntöttük a művért, amely a szilikoncső által szimbolizált elvezető csatornán át a húgycsővön keresztül a húgyhólyagba ürült, azaz a lufiba. A szűrőpapíron keresztül jól megfigyelhetjük, hogy a vér egy része jutott csak át. *Vizelet előállítás*a során az első lépés az volt, hogy 3 különböző vizeletet készítettünk. Az első egy egészséges ember vizelete volt, amelyet desztillált víz, NaCl, ammónium-szulfát és KCl segítségével állítottunk elő.

A második egy cukorbeteg vizelete volt, latinul diabetes mellitus, magyarosan diabétesz, a glükóz feldolgozási zavara, aminek oka a hasnyálmirigy Langerhans-szigetei által termelt inzulin hiánya, vagy a szervezet inzulinnal szembeni érzéketlensége (inzulinrezisztencia), relatív inzulinhiány, vagy mindkettő. Az abszolút vagy relatív inzulinhiány következtében, mivel a sejtek inzulinhiányában nem képesek a glükóz felvételére, a vércukorszint megemelkedik, ezek együttesen okozzák a betegség fő tüneteit.

Az elnevezés a két fő tünetre, a cukor vizelettel való fokozott kiválasztására és a megemelkedett vizeletmennyiségre utal. Ezt az előző összetevők által elkészített vizelet-hoz való glükóz adagolásával szemléltettük.

A harmadik vizelet pedig egy gyulladással járó betegségben szenvedő ember vizelete volt, amelyet úgy készítettünk, mint az egészséges emberét, de még tojásfehérjét adtunk hozzá. Ezt követte a vizelet betegségeinek kimuta-

tása, elemzése. Rendelkezésünkre állt ezüst-nitrát, ammónium-karbonát vizes oldata, bárium-klorid vizes oldata, ammónium-hidroxid, NaOH (tömény) és réz-szulfát. A 3 vizeletmintát 5-5-5 A, B és C-vel (összesen 15) megjelölt kémcsőbe osztottuk el. Először 4 csepp ezüst-nitrát oldatot tettünk az első kémcsővekbe, ez a kloridion kimutatására vezetett minket. Ez után a 2. kémcsővekbe nátrium-hidroxid oldatot öntöttünk, majd ammónium-karbonátot. A vizeletekben fehér csapadék képződött, amely a kalcium-iont mutatta ki. A 3-as számú vizeletmintához bárium-karbonátot öntöttünk, az ismételt fehér csapadék akkor vált ki, ha maga a vizelet tartalmazott szulfátiót. Továbbá ezüst-nitrátot adva a 4. kémcsővekhez, fehér csapadék vált ki, ehhez ammónium-hidroxidot csepegtettünk. Ha ezt Bunsen-égővel melegítettük, akkor a glükózt tartalmazó vizelet falán elemi ezüst vált ki. Így bebizonyítottuk, hogy az adott vizeletminta egy cukorbeteg ember vizelete. Ezt követték az utolsó kémcsővek, amelyekhez nátrium-hidroxid oldatot öntöttünk, majd réz-szulfát oldatot. Ha a minta elilult, akkor a fehérjét tartalmazó vizeletet tudtuk kimutatni.

\*

Mindig jó új dolgokat kipróbálni, főleg ha hasznosak is. A laboratóriumi órákkal tovább bővíthettem a lexikális tudásomat és sok gyakorlati tapasztalatot szereztem, amely a későbbiekben és akár az érettségi vizsgán is hasznos lehet. Az ember egy nagyon érdekes teremtmény és csodás összehangoltság jellemzi a felépítését. Mint ahogy a vesénél is láhattuk, a hormonrendszerrel kezdve a keringésen át sok minden szabályozza működését. Nagyon fontos tehát minél többet tanulni róla, hiszen innen tudunk majd új célokat elérni és betegségeink gyógyítására minél korszerűbb gyógyírt feltalálni. \*

### Irodalom

- Donáth Tibor: Anatómia élettan (2010.)  
 Gál Béla: Biológia 10, Biológia 11 (2010.)  
 Fazekas György-Szerényi Gábor: Biológia 2. kötet (2009.)  
[wikipedia.org/wiki/Cukorbetegsagerettsegi22.com/biologia/csalanozok](http://wikipedia.org/wiki/Cukorbetegsagerettsegi22.com/biologia/csalanozok)  
<http://www.kamaszpanasz.hu/hirek/test/4412/vesetktamop.elte.hu>  
[http://www.motic.com/As\\_Microscope\\_software/](http://www.motic.com/As_Microscope_software/)  
[http://anatomy.szote.u-szeged.hu/Anatomy2/static/hu/tantermi/2015\\_2\\_06\\_vese.pdf](http://anatomy.szote.u-szeged.hu/Anatomy2/static/hu/tantermi/2015_2_06_vese.pdf)  
[https://www.google.hu/search?q=vese+anat%C3%B3mia%C3%A1ja&biw=1024&bih=639&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwicoML7-DPAhUhb5oKHaJPAFMQsAQIPA&dpr=1#tbm=isch&q=vese+m%C5%B1k%C3%B6d%C3%A9s&imgrc=\\_](https://www.google.hu/search?q=vese+anat%C3%B3mia%C3%A1ja&biw=1024&bih=639&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwicoML7-DPAhUhb5oKHaJPAFMQsAQIPA&dpr=1#tbm=isch&q=vese+m%C5%B1k%C3%B6d%C3%A9s&imgrc=_)



KÁNTOR SÁNDORNÉ

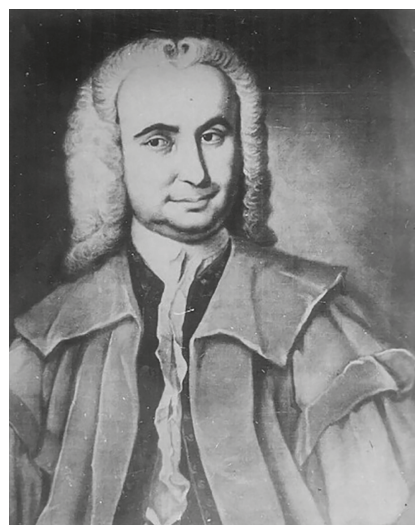
# Segner János András, a turbina atyja

(POZSONY, 1704 – HALLE, 1777)

Segner János András, *Segner Hungarus*, az első magyar származású tudós professzor, akit a nemzetközi tudománytörténet is jegyez matematikai, fizikai és orvosi munkásságáért. Magyarországon tanult, rövid ideig Debrecen városának volt a fizikus-orvosa. Később, felnőttként, németországi tartózkodása alatt is magyarnak vallotta magát, mindig támogatta a magyar fiatalokat, sőt még magyarul is tartott kurzusokat számukra a göttingeni egyetemen.

Itt igazi magyar hazafiakká váltak. Josef Segner kapitányként harcolt a törökök ellen, és fiai, Mihály és Baltazár, 1596-ban II. Rudolftól nemesi rangot kaptak, amelyet a család számára III. Ferdinánd 1641-ben és 1644-ben, majd 1755-ben pedig II. Frigyes porosz király Segner János András számára megerősített.

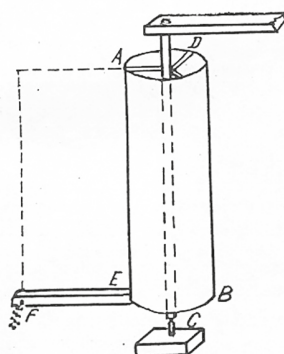
A Segner család Pozsony előkelő és gazdag családjai közé tartozott, foglalkozásuk szerint volt köztük például főbíró, városi kamarás, kereskedő, egyház- és iskolafelügyelő. Vezető szerepet játszottak a lutheránus egyházközösségekben, ők alapították a Templom utcai evangélikus is-



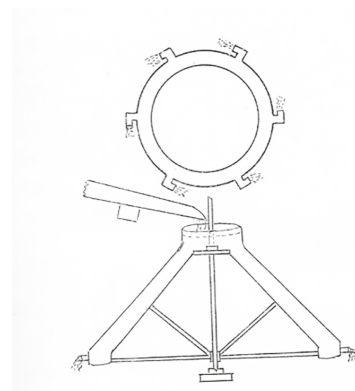
Segner János András



Segner-kúria Pozsonyban



Segner hidraulikai gépe

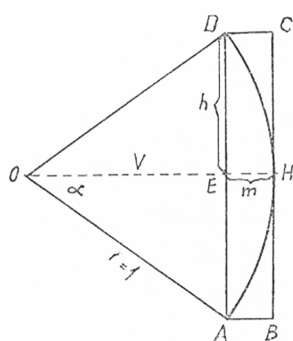


A Segner-kerek Euler ábrája szerint

kolát, a pozsonyi liceumot, amelynek *Bél Mátyás* volt az igazgatója. Az általuk építtetett lutheránus templom a későbbekben az orsolyitákhoz került. Emeletes házukat emléktábla őrzi Pozsonyban, közel a Mihály kapuhoz.

## Segner János András élete és pályafutása Gyermek- és ifjúkor, pályakezdés (1704–1735)

Segner János András 1704. okt. 9-én született Pozsonyban, *Segner Mihály* városi kamarás, és *Fischer Krisztina* egyik fiaként. Iskoláit a *Bél Mátyás* (1684–1749) által vezetett Pozsonyi Evangélikus Líceumban kezdte, majd Győrben, az evangélikus iskolában folytatta. A kor szokása szerint a protestáns ifjakat, elsősorban nyelvet és műveltséget tanulni, a híres protestáns iskolákba küldték. *Bél Mátyás* leírása szerint Segner 1722. szeptember 20-án elment a magyarok-



$\pi$  közelítése

A Segner család német származású és lutheránus volt. A reformáció kezdeti szakaszában, Stájerországból a válásüldözés elől menekülve, emigráltak Magyarországra és költöztek Pozsonyba.

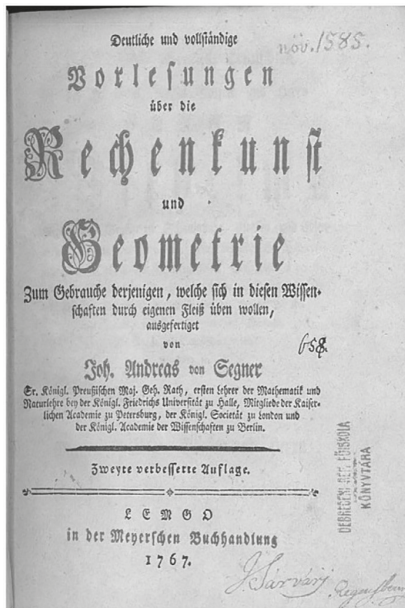


Anfangsgründe der Arithmetik



hoz Debrecenbe. 1723. szeptember 15-én ismét folytatta tanulmányait az ősi Debreceni Református Kollégiumban, mint bejáró diák. Itt nagy hatással volt rá a filozófia-fizika tanszéken működő *Szilágyi Márton professzor*, aki magas színvonalon, bár kartézianusi alapokon oktatta a fizikát.

Matematikával *Mikoviny Sámuel* (1698–1750) hatására kezdett foglalkozni. Érdekes a témák egybeesése, mert Segner is és Mikoviny is foglalkozott a kör négyszögesítésének a kérdésével, de megoldásuk, a  $\pi$  közelítésére adott eljárásuk, más volt. Segner a kör területét a körbe és a kör köré írt sz-



Deutliche und vollständige Vorlesungen

bályos sokszögek segítségével közelítette meg. Egy jól konvergáló módszert dolgozott ki. A 96 oldalú sokszög esetében a  $\pi$  értékét 6 tizedes jegy pontossággal kapta meg. Eredményeit az 1757-ben megjelent *Cursus Mathematica* (Matematika Kurzus) című könyvében megtaláljuk.

Mikoviny 1730-ban írta meg a kör négyszögesítésével foglalkozó első, 1739-ben a második munkáját latin nyelven. Ő az *arcus tangens* függvény *Maclaurin-sorát* használta fel. *Lagny* (1719) kutatásaira támaszkodva készített két gyorsan konvergáló sort  $\pi$  közelítésére.

Segner valószínűleg betegsége (tífusz) miatt fordult az orvostudomány és a gyógyszerészet felé, és volt a későbbiekben gyógyszerári gyakornok Pozsonyban.

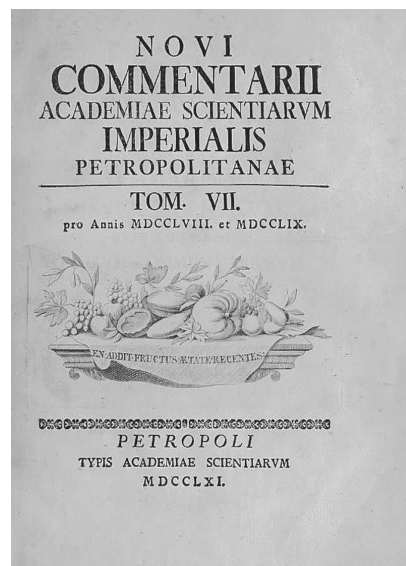
Debreceni tanulmányai után, 1725-ben külföldi tanulmányútra és felsőfokú tanulmányainak folytatására Jénába ment, ahol matematikát, fizikát, kémiát és orvostudományt tanult. Három disz-



Einleitung in die Naturlehre

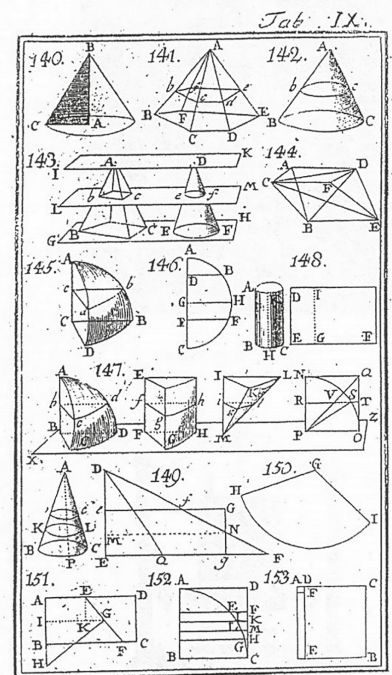
szertációt készített. A kémiai dolgozatában (1726) az *alkáli sókkal foglalkozott*. Matematikából *G. E. Hamberger* tanítványa volt. Az ő vezetésével jelent meg az első jelentős matematikai dolgozata, amelyben *Descartes előjel-tételét igazolta*. Sokáig azt hitték, hogy ez a disszertáció elveszett. A megjelenés évszáma sajtóhibás, így az egyes forrásokban különböző évszámokat találunk (1718, 1725, 1726, 1728). Orvosi diplomáját 1729-ben szerezte meg, az orvostudomány diplomáját pedig 1730-ban kapta meg. Disszertációja: Az orvostudomány természetéről és alapelveiről (*De natura*

Novi Commentarii Acad. Sci. Petropolitanae



et principiis medicinae, 1730). A filozófia doktora címet is 1730-ban szerezte meg. Orvoscént Magyarországon akart praktizálni. 1729-ben Pozsonyba ment, utána 1730-ban elfogadta a Debrecen város által felkínált, évi 200 forint fizetéssel járó orvos-fizikusi állást. Erre Bél Mátyás ajánlotta *Szeremlei Sámuel* debreceni nótáriusnak, aki éppen a pozsonyi diétán találkozott vele.

„Tegnap szólék Bél urammal. Fölötte igen commendálja Segner urat, hogy derekasan abszolváta studiumait, sőt kollégiumot is olvasott, jó mathematicus, oda fel professzorságot is várhatna. Láttam magam is, elég activusnak látszik.” (Szeremlei Sámuel)



Cavalieri-elv: Tab. IX. 143. ábra  
Anfangsgründe der Arithmetik (1764)

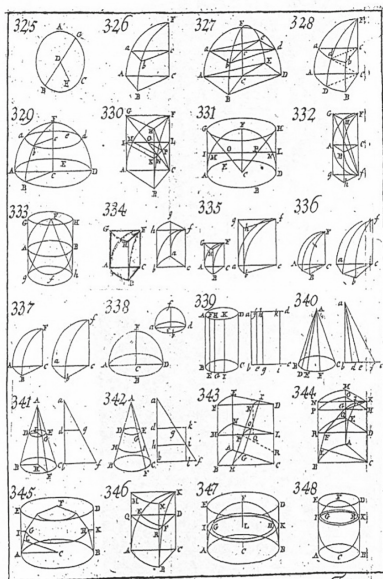
Segner 1732-ben már ismét Jénában van. Oka többféle lehetett. Egyrészt szakmai, mert a weimari herceg felkérte előadások tartására, és egyetemi katedrát ígért neki, másrészt a szerlem professzorának a lánya, *Maria Carolina Sophia Teichmüller* iránt, akit 1732-ben feleségül is vett. Házasságukból egy fiú és egy lány született. 1764-ben fia, *Johann Wilhelm* von Segner (1738–1795) fordította le az apja latin nyelvű *Elementa* matematika könyvét németre (*Anfangsgründe der Arithmetik, Geometriae und der Geometrischen Berechnungen*, 1764), és ő adta ki apjának a *Grund der Perspektiva* (1779) (*A perspektíva alapja*) című befejezetlen munkáját.



Segner már ekkor szeretett volna a tekintélyesebb hallei egyetemre kerülni, de ennek egyfelől protestáns vallása, másfelől szókimondó, bíráló természete volt az akadálya. Oda csak a kartézianus *Christian Wolff* halála (1754) után, *Euler* ajánlására hívták meg professzornak.

### A göttingeni professor (1735–1755)

Az 1730-as években kezdték meg Göttingenben az egyetem szervezését, ahol aztán *G. E. Hamberger* professzor ajánlására 1735-ben a bölcselati karra, a matematika-fizika tanszékre Segnert hívták meg, aki 20 évig tanított a göttingeni egyetemen mint a matematika, fizika, tanára. Bemutakozó programjában a matematika jelentőségét ismertette, és a forgástestek geodetikus görbéinek a problémáival foglalkozott. Legfőbb célja a matematika szerepének



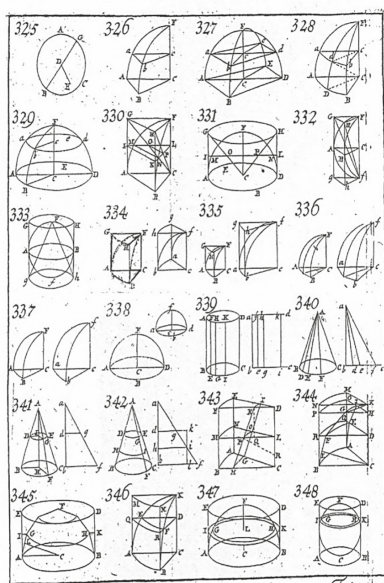
Tab. XII.

Cavalieri-elv: Tab. XII. 331. ábra Deutliche und vollstanständige Vorlesungen (1767)

színűség-számítást, geometriát, sík- és térbeli trigonometriát. Fizikából optikát, dioptrikát, mechanikát, asztronómiát, földmérést. Óráin bemutatott fizikai kísérleteket is. Egy fizika könyve van, az *Einleitung in die Naturlehre* (Göttingen, 1740, (Bevezetés a természettudományokba), amely feloleli az akkor ismert fizikaanyagot. Ebben ismertette úszó szökőkútját.

Segner foglalkozott orvosi problémákkal is, például a tüdőfékellyel, az érzékeléssel, az abortusszal, a betegségek változásaival, számításokat végzett az izomműködés energiájára vonatkozólag, és elméletet alakított ki a vastagbélbillyentyűk hármaskörű funkciójára. Írt élettani tanulmányt is. Ezek az orvosi értekezések élettani, kémiai, higiéniai tárgyak voltak, de foglalkoztak magyar vonatkozásokkal is, például a felvidéki bányászok betegségeivel és az ólommérgezéssel.

A Segner család nagy társadalmi életet élt. Segner igencsak kedvelte a zenét, és szeretett mesélni. Göttingenben a házuk nyit-

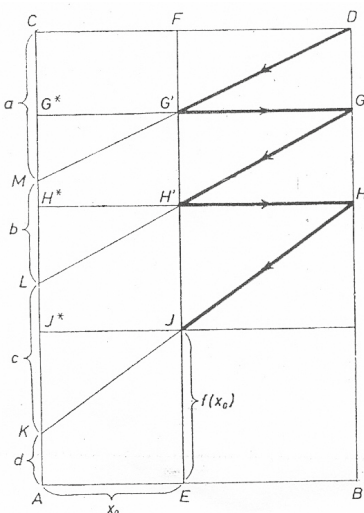


Tab. XII.

Cavalieri-elv :Tab. XII. 331. ábra Deutliche und vollstanständige Vorlesungen (1767)

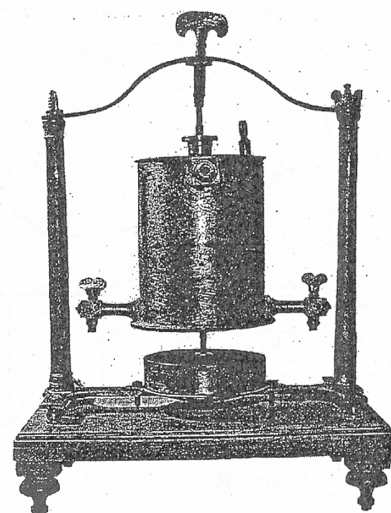
és jelentőségének az elismertetése volt. Ezzel lényegében megalapozta a későbbi híres göttingeni matematikai iskolát.

1736-ban áthelyezték az orvoskarra, mert meghalt az orvoskar egyetlen professzora. Élete végéig mindkét kar tanára maradt, a filozófiai karé és az orvoskaré. Tartott orvosi, kémiai előadásokat, de voltak filozófiai és csillagászati előadásai is. Kötelező előadásait elsősorban matematikából és fizikából tartotta. Tanította a tiszta és alkalmazott matematikát, a logaritmust, a való-



A Segner-féle grafikus módszer

Segner emléktáblája



Segner-kerek a Ref. Kollégiumban

va állt a magyarok előtt. Sok nagyon fontos, Segnert éppen akkor foglalkoztató, gyakorlati problémát tárgyaltak meg (szeszűzés, műtrágyázás, öntözés stb.). Gyakorlati ember volt, számos kisebb-nagyobb találmány fűződik a nevéhez. Javasolta például a vetőmagok kén-dioxiddal való csávázását, a sovány földek káliumtartalmának fahamuval való pótlását. Foglalkozott a cukor-, szesz- és puskaporgyártásának technológiájával, javasolt húspácolási eljárást. Ő tanította meg *Teleki Pált* és nevelőjét, *Halmágyi Istvánt* arra, hogy hogyan kell szeszt főzni és likőrt készíteni.

1750-ben készített egy olyan rézbe karcolt műszert, ami a logarléc elődjének tekinthető. Erről *J. H. Lambert*



Segner Hungarus emlékérem (1972)



sok vitát és ellenségeskedést váltott ki, végül is lemondott az igazgatói székről a fiatal feltörekvő csillagász Tobias Mayer (1723–1762), későbbi göttingeni professzor javára.

Megjegyezzük, hogy Euler jó viszonyban volt Tobias Mayerrel, akinek csillagászati eredményeit az elméleti csillagászat csodálatos mesterművének nevezte. 1751–1755 között együtt dolgoztak olyan Nap–Hold táblázatokon, amelyeket a hajózásban fel lehetett használni.

### A hallei professzor (1755–1777)

Segnernek Euler pártfogásával sikerült igen előnyös feltételek mellett elnyernie a hallei egyetemen Ch. Wolff halála után megüresedett matematikai-fizikai tanszéket. Ekkor már európai hírnévű tudós. Tagja volt a londoni Royal Societynek (1739-től), a berlini Akadémiának (1747-től), a Göttingeni Kir. Tudományos Társulatnak (1751-től) és a Szentpétervári Akadémiának (1754-től). Halleban honosították a magyar nemesi oklevelét (von), megkapta a titkos tanácsosi és az első professzor

svájci matematikusnak számolt be 1777. március. 22-én hozzáírt levelében.

Szót kell ejteni Segner természetéről is. Nagy tudása miatt becsülték, de megalkuvást nem ismerő természetét sokan nem szerették. Akadékoskodó, sőt németellenes magatartásáért például C. L. Scheidt fásosztónak titulálta (1754). Ma talán azt mondanánk rá, hogy megosztó egyéniség volt. Mint nyílt, egyenes, szókimondó ember, többször keveredett szakmai vitába professzorkollégáival, például a tekintélyes Ch. Wolff hallei professzorral, akinek a munkájában felfedezett hibákat szóvá tette, vagy göttingeni kollégájával, Hollman professzorral is. Későbbi utódjával, Tobias Mayerrel, a göttingeni csillagvizsgáló berendezésében és vezetésében támadt ellentéte.

E. G. Forbes munkájában külön kiemelte, hogy Segnernek rossz természete volt. Ehhez a véleményhez hozzájárult az, hogy a göttigeni egyetemen az indulásakor egyedül Segner nem volt német, és ennek ellenére jelentős tudományos eredményeket ért el, mint Segner Hungarus. Jó barátságban és szakmai együttműködésben volt Eulerrel, aki a szakmai vitákban egyetértett vele. Eulerrel való kapcsolatát fémjelzi levelezésük is.

Göttingeni tartózkodása alatt fizikai felfedezései kiemelkedőbbek, mint a matematikaiak. Legjelentősebb felfedezése a hidraulika területén történt, megalakította a reakciós turbina őseit. 1738-ban Daniel Bernoulli Hydrodynamics munkájában közölte, ha a víz egy edényből oldalt kifolyik, akkor az edényre olyan F erő hat, amely a kilépő vízzel ellentétes irányú (hatás-ellenhatás elve). Ennek az elvnek az alapján készítette el Segner a róla elnevezett Segner-kereket, amit Euler mutatott be a német Akadémián (1750, 1752). Összefoglaló tanulmányában: Hidraulikus gyakorlatok köteté, ábrákkal (*Fasciculus exercitationum hydraulicarum, cum figuris, 1747*) is-

mertette a Segner-kerek elvét, és kiszámította a várható teljesítményét is.

Euler munkáiban hivatkozott Segner eredményeire: „A kutatások a Segner göttingai professzor által javasolt hidraulikus gép hatásfokával vannak kapcsolatban.”, vagy „Egy hidraulikus gép effektusának meghatározása, amelyet Segner göttingai professzor talált fel.” „Segner úr gépének alkalmazása mindenféle munkára és előnyei más hidraulikus gépekkel szemben, amelyeket általában használnak.”



Segner-mellszobor a DOTE-n (1974)

A gyakorlatban Nörtenben, egy olajmalomban próbálták ki a találmányt. Ma már csak kerti locsolásnál használják a berendezést.

Több esetben Segner eredményei biztosították az alapot Euler kutatásaihoz. Eredményei képezték az ún. Euler-egyenletek alapját, amelyek a merev testek és folyadékok mechanikájának alapvető törvényei.

Göttingeni tartózkodásának utolsó korszaka a csillagvizsgáló megalapítása és felszerelése volt. Ez a tevékenysége



(*Professor primatus*) címet, ami azt jelentette, hogy az egyetemi tanácsban a prorektor és az igazgató után harmadikként ő következett. Előadásait a programban külön ismertették.

Hallei bemutatkozása a pörgettyű-elmélettel kapcsolatos tanulmányaival kezdődött (1755). Ez volt Segner másik jelentős munkája, és a merev testek forgására, a pörgettyűkre vonatkozott. Euler a merev testek három egymásra merőleges tengely körüli forgásáról (*Theoria motus corporum rigidorum,*



1765) írt dolgozatának bevezetésében Segnert mint a három főtengelyprobléma első felvetőjét idézi.

Hallei professzorsága már kizárólag a fizika és a matematika jegyében zajlott, bár dékánként és prorektorként arra törekedett, hogy az orvoskaron, a botanikán kívül a fizika és a kémia is épüljön be a tantervekbe. Azt hirdette, hogy korszerű természettudományi ismeretek nélkül nem lehet eredményesen

### Segner tudományos munkássága

Magyarországon először a Szinnyei-féle könyvészetben találjuk meg Segner 66 összegyűjtött munkájának felsorolását, amihez a későbbiekben kiegészítések jöttek. Most kb. 90-re teszik a számukat. Munkáinak témái: matematika, fizika, csillagászat, filozófia, orvosi kérdések, egyetemi programok, gyakorlati ismeretterjesztő munkák, találmányok.

irat megvan a Nagykönyvtárban, így Segnernek az abban közölt két cikke az ábrákkal együtt elérhető.

Segner nagyon jó oktató volt. Matematikai munkássága elmarad kora legnagyobb matematikusaié mellett, míg fizikából eredményei és felfedezései maradandóbbak, hisz kora legnagyobb tudósa Euler is felhasználta. Matematikából tankönyvírói tevékenysége a jelentősebb. Nagyon jó tankönyveket írt. *Szenássy Barna* kiemeli, hogy: *Segner tankönyvei azért váltak ismertté, mert igen jó érzéke volt ahhoz, hogy a múlt hagyatékából kiemelje a feledésbe merült, hasznosítható eredményeket, a jelen lényeges vívmányait pedig módszeres feldolgozással tette érthetővé a szélesebb néprétegek számára.* Segner a tanítás során látta, hogy nem kielégítő a hallgatók rendelkezésére álló anyag a tanuláshoz, ezért kezdett hozzá sorban a tankönyvek megírásához.

Több elemi algebrai és geometriai bizonyítás az ő írása alapján ment át a tankönyv-irodalomba. Ez történt példá-



Segner emlékbélyegek

orvosi tanulmányokat folytatni. Ő volt a kezdeményezője a meteorológiai adatok matematikai eszközökkel való kiértékelésének.

Számos találmánya volt. 1755-ben tervezett egy olyan *kanócos olajlámpát*, amit a diákok igen jól tudnának használni, 1758-ban pedig egy orvostörténeti szempontból érdekes *parafa mentőövet*, amely egy vízbefulladás elleni védőberendezés volt. Rekonstruálta Marcus Terentius Varro (Kr. e. 116–27) *forgókeresztes kalitkáját*, foglalkozott a *római víziórák* elvével. Tanulmányozta az *üstökösök pályáját* és 1799-ben kifejlesztett egy *csillagászati észlelő műszert*, 1760-ban tanulmányt írt a *Galilei-féle távcsőről*. Ismeretterjesztő munkái a Hallei Heti Hírekben (*Wöchentliche Hallische Anzeigen*) jelentek meg. Tárgyalta a *szerecsenyjátékok találati valószínűségét* (1757), illetve olyan *kályha tervezésével* foglalkozott, amely takarékos fogyasztású és csekély füstöt ad.

Az elméleti kutatások terén a nagy Fermat-tétel, az algebrai egyenletek gyökeinek grafikus ábrázolása, a mágnesség, a sűrűlódás, a differenciálszámítás és az algebra kérdései foglalkoztatták.

Az 1770-es évek második felében betegség (hypochondria) tünetei jelentkeznek nála. Előadásait megtartotta, és még egy érdekes cikket is közölt arról, hogy milyen természeti jelenség okozhatta a zsidóknak az Őszövetségben leírt Vörös tengeren való átkelését.

1777. október 5-én halt meg.

Ezek egy része tudományos folyóiratokban (Göttingeni Kir. Tudományos Társaság, a Berlieni és a Pétervári Tudományos Akadémia kiadványaiban (Novi Commentarii Academiae Petropolitanae) jelent meg, másik része pedig egyetemi jellegű kiadvány, diszsertációk, tankönyvek. Egyes munkák többször is megjelentek, mert van latin és német nyelvű változatuk.

Segner első *matematikai értekezése* a doktori disszertációja volt, amiben Descartes előjeltételét igazolta. Erre a témára a későbbiekben visszatért.

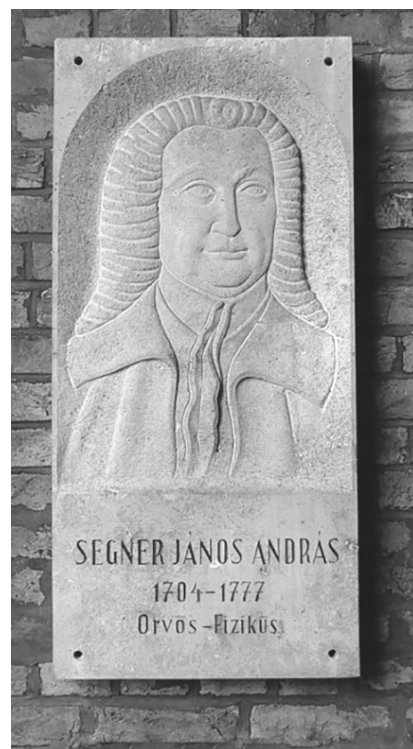
A Debreceni Református Kollégium Nagykönyvtárában Segnernek 11 munkája található meg, melyek elsősorban orvosi jellegűek, valamint a legjelentősebb három, németre lefordított könyve, amelyek Sárvári Pál tulajdonában voltak.

*Anfangsgründe der Arithmetik, Geometriae und der Geometrischen Berechnungen* (Az aritmetika, geometria és a geometriai számítások alapjai), Halle, 1764. Ez a könyv a Cursus Mathematici I. német változata.

*Deutliche und vollständige Vorlesungen über die Rechenkunst und Geometrie* (Világos és teljes előadások a számolásról és a geometriáról) azok számára, akik tudásukat saját szorgalmukkal akarják növelni) Lemgo, 1767. Kb. 800 oldal.

*Einleitung in die Naturlehre* (Bevezetés a természettudományokba) Göttingen, 1770.

Mivel a Novi Commentarii Academiae Petropolitanae tudományos folyó-



Segner-dombormű Szegeden

ul a *Cavalieri-féle elvvel* (1626) is, amelyet beépített pl. a Cursus Mathematici (1757) könyvébe, és sokáig neki tulajdonították a felfedezését, az ő nevét viselte.

Egyes latin vagy német szavait (pl. faktor, valódi tört, tizedes tört, az aránynál kultag és beltag) ma is sok nyelvben, tükröfordításban használják.

## Néhány Segner által tárgyalt matematikai probléma XX. századi felelevenítése

### 1. Euler-probléma

Érdekes az a probléma, amelyet Euler vetett fel 1751-ben *Goldbach*hoz írt levelében:

*Az n-oldalú síkbeli konvex sokszög hányféleképpen bontható fel egymást nem metsző átlók segítségével háromszögekre? A problémát Euler teljes indukcióval, igen hosszasan bizonyította be. Segner egy rekurzív formula alapján adta meg a megoldást 1758-ban. Ma az Euler-sokszög felbontási problémája Segner megoldásával elérhető minden középiskolás számára Dörrie: *A Diadalmas matematika* című könyvében.*

*Az 1956. évi Schweitzer Miklós Emlékversenyen az Euler-probléma kiegészített változatát tűzték ki, amelyben azt kérdezték, hogy az összes lehetséges megoldásból hány az olyan háromszöggelések száma, amelynél a sokszöget csupa olyan háromszögre daraboljuk, amelyek mindegyikének legalább egy közös oldala van magával a sokszöggel.*

### 2. A *KöMal* 39. kötete (1969, 123–125) F 1655 alatt tárgyalja a következő problémát:

Igazoljuk az alábbi – Segner János András (1704–1777) debreceni orvostól eredő eljárás helyességét!

Legyen adott az  $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$  ( $a, b, c, d > 0$ ) valós együtthatós polinom; grafikus úton keresendő  $f(x_0)$ , ahol  $0 < x_0 < 1$ . Vegyük fel az  $AB = 1$  szakaszt, és erre az A pontból kiindulva mérjük fel  $x_0 = AE$  adott értéket. Az A, E és B pontokból húzzunk AB-re merőleges félegyeneseket, továbbá az A-ból kiinduló merőlegesre mérjük rá rendre, egymás végpontjaihoz fűzve a  $d, c, b$  és a koefficienseket. Ily módon nyerjük a K, L, M és C pontokat. Az F és D pontokhoz pedig úgy jutunk, hogy az AB szakasszal párhuzamost húzunk. Megvonva mármint a DM egyenest, az az FE egyenest a G' pontban metszi. A G' ponton át az AB-vel párhuzamost rajzolva, kapjuk a G pontot. Ugyanígy járva el a GL, majd a HK egyenessel, végül is az EJ távolság adja  $f(x_0)$ -t.

Kiterjeszthető-e az eljárás érvényessége a mondott korlátozások csökkentésével?

A feladatra kétféle megoldás is érkezett.

## Segner emlékének őrzése

*„Segner, aki büszkén vallotta magát Segner Hungarusnak, nem kizárólag a debrecenieké. Nem egyedül a magyarságé, hanem az egyetemes kultúra, az emberiség nagy alakjai közé tartozik.”* (Szamosújvári Sándor, 1974)

Segner élete több országhoz kötődik, ezek a mostani földrajzi állapot szerint Magyarország, Szlovákia és Németország. Emlékének őrzését így életútjának állomásai szerint vizsgáljuk (a teljesség igénye nélkül).

Szülővárosa Pozsony, akkor Magyarországon volt, ami ma Szlovákia fővárosa. Pozsonyban a Segner kúriát (Mihály u 7.) emléktábla őrzi, a Dunaparton áll egy emlékmű, és a szlovák posta emlékbélyeget jelentetett meg.

Magyarországon 1967-ben volt az első Segner-emlékkiállítás és 1969-ben indult a Segner-mozgalom. 1972. október 9-én és 10-én Budapesten és Debrecenben *Segner Napokat* rendeztek Segner János halálának 195. évfordulója alkalmából. Házigazdája az Energia Gazdálkodási Tudományos Egyesület volt, de képviseltette magát az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Debreceni Református Kollégium, a DOTE, a KLTE részéről Szénássy Barna, Debrecen városa, a hallei Martin Luther Egyetem.

Debrecenben a lebontott Kisállomás helyén újonnan kialakított teret róla neveztek el és ott egy emléktáblát is elhelyeztek. A Segner teret azóta átépítették, a régi földszintes házak helyére nagy emeletes házak kerültek. Az egyik falán, alig olvashatóan, ott van az emléktábla.

A Református Kollégiumban egykor Segner-szobát rendeztek be, ami ma már nincs meg, egyedül egy régi Segnerkerék látható egy iskolatörténeti kiállításon. Mikus Sándor szobrának gipszmásolata a Református Gimnázium 2. emeletén van elhelyezve.

Az 1972. évi emlékünnepe alkalmából 10 főnek, köztük Szénássy Barnának adták át a kétoldalas *Segner Hungarus*-emlékplakettet.

1974. október 5-én, születésének 270. éves évfordulóján, Debrecenben az Orvostudományi Egyetem és a város összefogása révén a DOTE területén az új Elméleti Tömb mellett felállították Mikus Sándor Kossuth-díjas szobrászművész által készített Segnermellszobrot, és átadták a szervezőknek a Segner-emlékplakettet. A Klinikum területén 2009-ben a mellszobrot ledöntötték, mert az új Kórélettani tömb építésekor útban volt. Azóta a bronzszobor a talpazattal együtt a Klinikum

2. telepén, az elfekvő raktár mögötti bekerített területen a bokrok között hever.

A kerek évfordulók alkalmából a Magyar Posta is kiadott emlékbélyegeket. Segnerről Mikus Sándor készített még két másik domborművet, az egyiket Szegeden a Dóm-téri Pantheonban, a másikat Hallében, a régi temetőben (Gottesacker) a 83-as boltívnel, Segner sírjánál helyezték el 1977-ben. Hallében a belváros egyik utcáját nevezték el róla és megjelölték Segner házat. Halálának 200. évfordulóján tudományos ülést tartottak.

A Holdon krátert neveztek el róla. \*

**Megjegyzés:** 2017-ben van a reformáció 500 éves évfordulója, és Segner halálának 240 éves évfordulója.

## Irodalom

- Bernoulli J. J. H. Lamberts deutscher gelehrter Briefwechsel, Berlin 1784. Band 4. p. 379.
- Energia és Atomtechnika XXV. évfolyam 12. szám, 1972. december 529-576.
- Energia és Atomtechnika XXVII. évfolyam 7. szám, 1975. december, 328-331.
- Jakucs István: Segner János András. Fizikai Szemle, 1955. 65-68.
- Kántor-Varga T.: Mathematical gems of Debrecen, old mathematical textbooks from the 16-18 th centuries, Teaching Mathematics and Computer Science 161(2003), 73-110.
- Kántor Sándorné Varga Tünde. Egy ismeretlen gyöngyszem a Debreceni Református Kollégium Nagykönyvtárának ritkaságai közül. Tobias Mayer matematikai atlasza. Debrecen, Könyv és Könyvtár, XXVI/2004, 111-132.
- Károlyi Zsigmond és László György: Segner János András, Műszaki Nagyaink Bp. 1967. 9-41.
- Nagy Mihály: A fizika és a 450 éves Debreceni Református Kollégium, Fizikai Szemle, 1989/ 3, 96-104.
- Segner J. A.: Anfangsgründe der Arithmetik, Geometriae und der Geometrischen Berechnungen, Halle, 1764.
- Segner J. A.: Deutliche und vollständige Vorlesungen über die Rechenkunst und Geometrie, Lemgo, 1767.
- Szénássy Barna: Segner András matematikai tevékenysége, Acta Univ. Debrecen. L. Kossuth nominatae, VI. Tom, Bp. Tankönyvkiadó, 1960. 37-42.
- Szénássy Barna: A reáliák tanítása a debreceni Református Kollégiumban, különös tekintettel a matematikára, Fizikai Szemle, 1989/ 3, 105-113.
- Tóth Gergely: Bél Mátyás pozsonyi tanítványai. A pozsonyi evangélikus liceum anyakönyvének vonatkozó részei Bél és utódai megjegyzéseivel. Nemzeti Téka, Bp. 2006.





Kalmár László  
(matematikus)

# TIT Kalmár László Matematikaverseny meghirdetése



A Tudományos Ismeretterjesztő Társulat 2017/2018. tanévre is meghirdeti a TIT KALMÁR LÁSZLÓ MATEMATIKAVERSENYT. Ez sorrendben a negyvenhetedik verseny, mely Magyarország legrégebbi iskolai matematikaversenye.

**A verseny célja:** A matematikai tudományos ismeretek terjesztése, a matematika népszerűsítése, matematika tehetséggondozás. A matematika ismeretének és alkalmazásának hangsúlyozása a társadalomban, a gazdasági életben, az egyén személyes boldogulásában. Felkészíteni a tanulókat a matematika tantárgyi alapú továbbtanulásra és a későbbi pályaválasztásra. A tanulók problémamegoldó képességének, kreativitásának összehasonlítása 3-8. osztályosok körében, matematikai tudás mérésének lehetősége objektív eszköz segítségével. A sportszerű verseny és küzdelem népszerűsítése.

**A verseny rendszere:** a verseny háromfordulós: helyi, megyei és országos szervezésű.

1. Helyi első fordulót az iskolák házi verseny keretében szervezhetnek, melyet öntevékeny módon, a korábbi évek tapasztalataira építve, a megyei forduló rendezőivel egyeztetve javasunk lebonyolítani. A forduló feladatait a helyi tanárok állítják össze. Helyi, házi verseny megszervezé-

se nem feltétele a megyei/területi döntőn való részvételnek. Időpontja: 2018. január hónap.

2. Megyei/területi döntő, melyeket a verseny szervezői helyben valósítanak meg. Az Egyesületek versenyszervezési szándékát kérjük, hogy 2018. január 19-ig /péntekig/ jelezzék a [titlap@telc.hu](mailto:titlap@telc.hu) mail címen. A megyei döntő lebonyolításáról a szervezőkkel /TIT Egyesület, Alapítvány/ írásos megállapodást kötünk.

**Versenyzők számára a megyei döntőre történő jelentkezés határideje: 2018. március 9.**

Megyei döntő időpontja: **2018. március 24. /szombat/ délelőtt 10 óra.**

A megyei döntő nevezési díja Magyarországon egységesen **1200 Ft**, melyet a verseny szervezője közvetlenül szed be a résztvevőktől és abból a helyi forduló lebonyolításának és az elkészült feladatok kijavításának költségeit fedezi. A helyi javítás után a versenyzők dolgozatát kérjük továbbítani a versenyközponthoz, ahol azok egy megadott pontszám felett újra javításra kerülnek.

3. Országos döntő, melyet a versenyközpont szervez Budapesten, ahová évfolyamonként a legtöbb pontot elért, legjobb teljesítményt nyújtó versenyzőket hívjuk be.

A vidékről érkező versenyzőknek a szállás és étkezés díjmentes, a kísérők számára önköltséges.

**Időpontja: 2018. május 25–26.** /péntek délután és szombat délelőtt/ két feladatfordulóval, melynek eredményét összesítő alakul ki a végleges sorrend.

A verseny nyerteseit tárgyjutalommal és oklevéllel díjazzuk.

**Általános tudnivalók:** A 3-4. osztályosok versenyfeladatának megoldására 60 perc, az 5–8. évfolyamosok számára 90 perc áll rendelkezésre.

A verseny során az alábbi segédeszközök használhatóak: körző, vonalzó, íróeszközök. Elektronikus segédeszközök és külső segítség igénybevétele egyik fordulóban sem engedélyezett.

A versenyre való felkészülést a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat folyóirataiban – *Élet és Tudomány* hetilap, *Természet Világa* havilap – megjelenő írásai és honlapjai segítik. A versenyről folyamatosan informáljuk az érdeklődőket a [www.titk.almarlaszloamatikaverseny.hu](http://www.titk.almarlaszloamatikaverseny.hu) portálon.

A XLVII. TIT KALMÁR LÁSZLÓ MATEMATIKAVERSENNYEL kapcsolatban további információ kérhető a [titlap@telc.hu](mailto:titlap@telc.hu) címen és a fenti címen, telefonszámon.

Eredményes versenyzést és sikeres lebonyolítást kívánunk.

Bojárskyné Piróth Eszter  
igazgató

Az NTP-TMV-17-0114 sz. projektet az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatja.



EMBERI ERŐFORRÁSOK  
MINISZTERIUMA



EMBERI ERŐFORRÁS  
TÁMOGATÁSKEZELŐ

# Wigner-emlékek



2013. november 17-én, Wigner Jenő Nobel-díjának 50. évfordulója alkalmából a Magyar Nemzeti Bank Wigner Jenő emlékérmet bocsátott ki

Wigner szobra Egerben, a magyar származású Nobel-díjasok emlékparkjában

A Wigner Jenő-díjat a Magyar Tudományos Akadémia és a Paksi Atomerőmű Részvénytársaság alapította 1999-ben



A Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából a Magyar Posta Wigner Jenő bélyeget adott ki (1999)

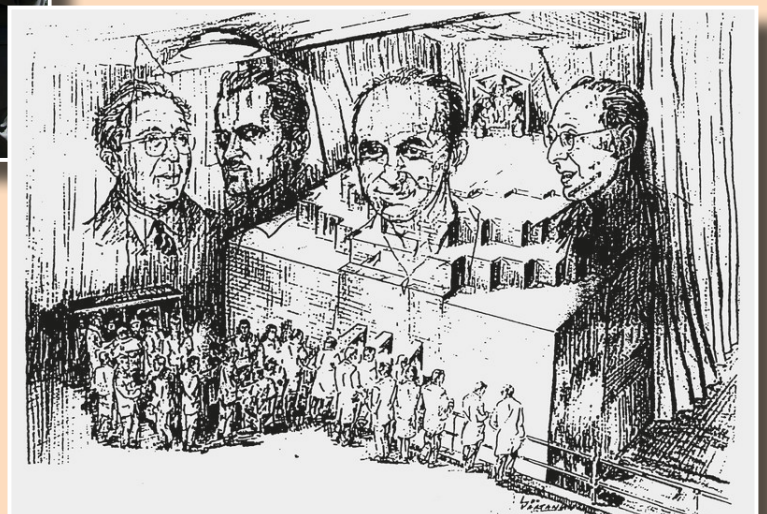


Pad Wigner Jenő egy idézetével a Göd-alsói vasútállomáson: „Bármilyen irányba is fejlődjenek jövőbeli fogalmaink, a külső világ tanulmányozása ahhoz a következtetéshez vezet, hogy a tudat tartalma a végső valóság.”



Az Európai Fizikai Társaság a Budapest-Fasori Evangélikus Gimnáziumot Wigner Jenő emlékére fizikai emlékhellyé nyilvánította, melynek emléktábláját Luisa Cifarelli és Kroó Norbert akadémikus avatta fel (2015)

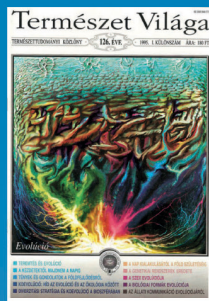
Az első atomreaktor és építői (1942, Chicago).  
A grafikán a reaktor készítői:  
Szilárd Leó, Arthur Compton,  
Enrico Fermi, Wigner Jenő



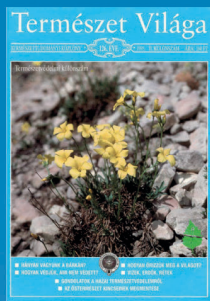


# A Természet Világa különszámai

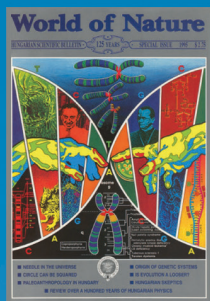
A különszámok ára az utolsó kettő kivételével egységesen 500 Ft. Korlátozott számban megrendelhetők a Kiadónknál, a Tudományos Ismeretterjesztő Társulatnál (1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16. Telefon: 327 8965, fax: 327 8969, e-mail: titlap@telc.hu).  
A **■**-tel megjelölt számaink már csak könyvtárakban hozzáférhetők.



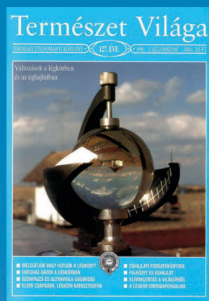
Evolúció (1995) ■



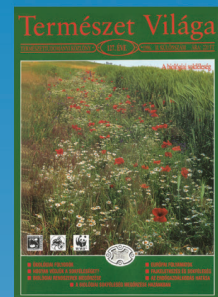
Természetvédelem (1995) ■



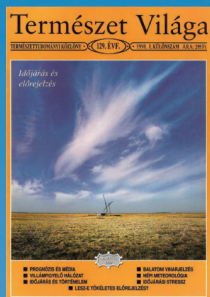
World of Nature (1995)



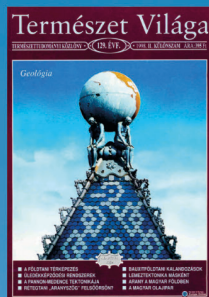
Változások a légkörben és az éghajlatban (1996) ■



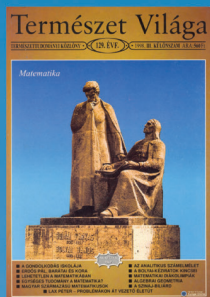
A biológiai sokféleség (1996) ■



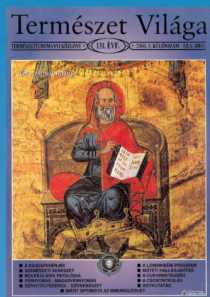
Időjárás és előrejelzés (1998) ■



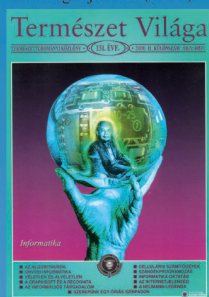
Geológia (1998)



Matematika (1998) ■



Orvostudomány (2000)



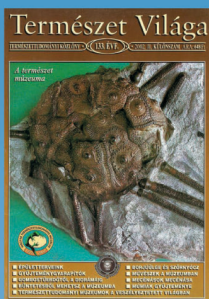
Informatika (2000)



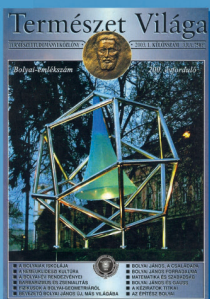
Mikrovilág (2000) ■



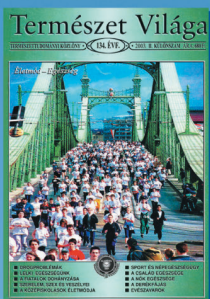
A magyarországi fizika kultúrtörténete (2001, 2002)



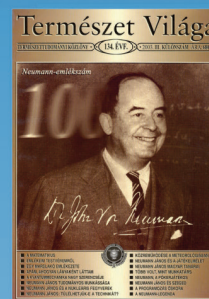
A természet múzeuma (2002)



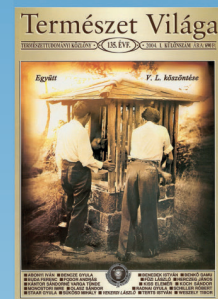
Bolygai-emlékszám (2003)



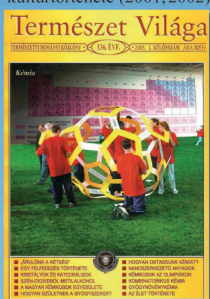
Életmód-Egészség (2003)



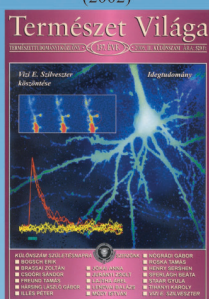
Neumann-emlékszám (2003)



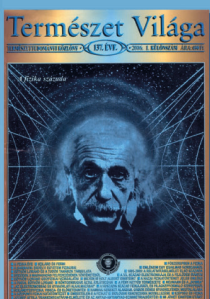
Együtt (2004)



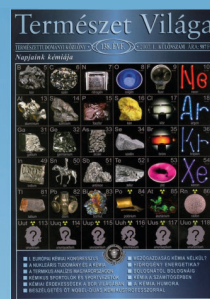
Kémia (2005)



Idegstudomány (2006)



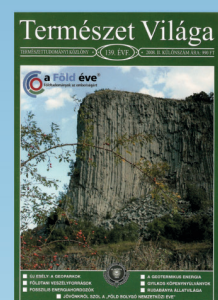
A fizika százada (2006)



Napjaink kémiája (2007)



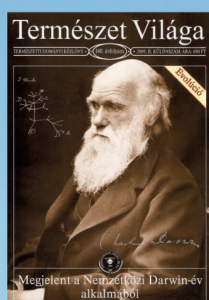
Földközvetben a világr (2008)



A Föld éve (2008)



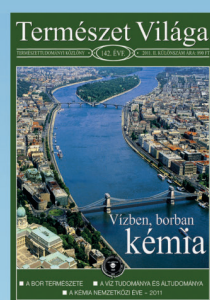
Feltárul a Vilégegyetem (2009)



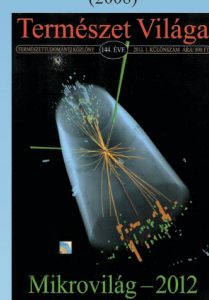
A Darwin-év (2009)



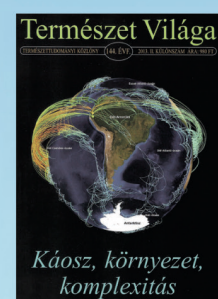
Emberközvetben a fizika (2011)



Vízben, borban kémia (2011)



Mikrovilág - 2012



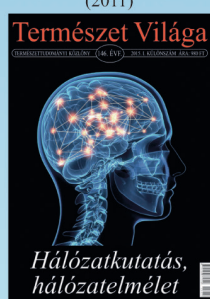
Káosz, környezet, komplexitás (2013)



A Kalmár-verseny feladatai (2014)



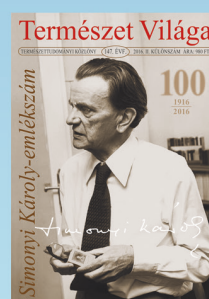
A fény nemzetközi éve (2015)



Hálózatokutatás, hálózatelmélet (2015)



Ember és környezet kapcsolata (2016)  
Ára: 980Ft



Simonyi Károly-emlékszám (2016) Ára: 980Ft

