

fizikai szemle

A vibrant astronomical image showing a galaxy or nebula. The central region is bright and multi-colored, with a core of orange and red, surrounded by blue and green filaments. The background is dark with scattered stars of various colors.

2013/12

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

Főszerkesztő:
Szatmáry Zoltán

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

Szerkesztő:
Füstöss László

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:
szerkesztok@fizikaiszemle.hu
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:
<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

Az Európai Déli Observatórium (ESO)
most 15 éves VLT távcsőrendszerének
egyik teleszkópjával közeli-infravörös
hullámhosszakon készített felvétel
az ESO 593-IG 008 jelű galaxisról.
Az optikai képe alapján korábban
kölsönható galaxispárnak ismerték,
az új felvétel viszont feltárta, hogy
3 galaxis összeolvadásának lehetünk
tanúi. A kiterjesztett szárnyú madárra
emlékeztető képződmény
a Madár-galaxis nevet kapta.
A 650 millió fényévre levő hármas két
korábban ismert galaxisának magja ezen
a képen a madár „szíve”, illetve
„gyomra”, az újonnan azonosított galaxis
magja pedig a madár „feje”.
A gravitációs kölcsönhatás
eredményeként a galaxisok között és
körülöttük kialakult árapálynyúlványok
kiterjedése 100 000 fényév, vagyis a mi
galaxisunk méretének megfelelő.

TARTALOM

<i>Gabányi Krisztina</i> : Páros galaxismagok a megfigyelő csillagász szemével	401
<i>Földesy Péter</i> : Képpalkotás sok száz giga- és teraherz frekvenciatartományban	405
<i>Csebi András, Halász Gábor, Vibók Ágnes</i> : Molekuláris szintű eszközök szerepe napjainkban	409
<i>Benedict Mibály</i> : A kvantummechanika a kísérletezők kezében: a 2012-es Fizikai Nobel-díj	413
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Radnóti Katalin, Király Béla</i> : Modellszámítások az energia oktatásához	422
<i>Stonawski Tamás</i> : Repülőgépek sebességének meghatározása különböző módszerekkel	425
<i>Jaloveczki József</i> : Hetediziglen „Fizikashow” a bajai Szent László ÁMK-ban	427
HÍREK – ESEMÉNYEK	431

K. Gabányi: Twin galaxy nuclei
P. Földesy: Imaging in the frequency domains of hundreds of GHz and THz
A. Csebi, G. Halász, Á. Vibók: An actual survey of the role of molecular devices
M. Benedict: Nobel price 2012: Quantum mechanics applied by experimentalists

TEACHING PHYSICS

K. Radnóti, B. Király: Typical specific calculations help to clarify the energy concept
T. Stonawski: The measurement of aircraft velocities
J. Jaloveczki: The “Fizikashow” at Baja, Hungary

EVENTS

K. Gabányi: Doppelte Milchstrassenkerne
P. Földesy: Abbildungen in den Frequenzbereichen von Hunderten GHz und THz
A. Csebi, G. Halász, Á. Vibók: Ein Überblick über die Rolle von molekularen Geräten
M. Benedict: Nobelpreis 2012: Experimentalphysiker nutzen Quantenphysik

PHYSIKUNTERRICHT

K. Radnóti, B. Király: Typische Berechnungen helfen zur Klärung des Energiebegriffs
T. Stonawski: Die Messung der Geschwindigkeit von Flugzeugen
J. Jaloveczki: Die „Physik-Schau” in Baja, Ungarn

EREIGNISSE

K. Габани: Двойные ядра
П. Фёльдеси: Оптическое образование в диапазонах частот 100 GHz и 100 THz
A. Чехи, Г. Халас, А. Вибок: Обзор роли молекулярных приборов
M. Бенедикт: Нобелевская премия 2012: прикладная квантовая механика в руках экспериментаторов

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

K. Radnóti, B. Király: Прикладные вычисления по сути понятия энергии
T. Stonawski: Разные методы измерения скорости самолётов
Й. Яловецкий: Выставка «Физика-шо» в городе Бая

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXIII. évfolyam

12. szám

2013. december

PÁROS GALAXISMAGOK A MEGFIGYELŐ CSILLAGÁSZ SZEMÉVEL

Gabányi Krisztina

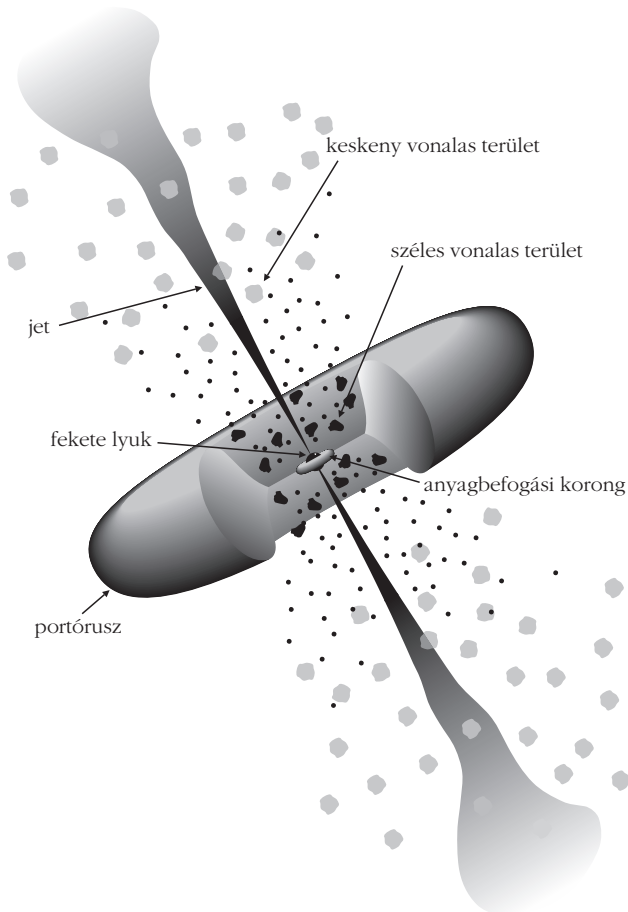
SZTE TTIK Kísérleti és Elméleti Fizikai Tanszékek, Szeged
MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

Napjainkban széleskörűen elfogadott elképzelés, hogy minden nagyobb galaxis középpontjában szupernagy tömegű fekete lyuk (supermassive black hole, SMBH) található. A jelenlegi elméletek szerint a galaxisok és így a középpontjukban található fekete lyukak kialakulásában is fontos szerepet játszott a galaxisok összeolvadása. Két fekete lyuk összeolvadásának folyamatát három fő szakaszra lehet osztani [2]. Először a két fekete lyuk dinamikai sűrűdés útján veszít energiát, miközben egyre közelebb jutnak a kialakuló új, egybeolvadó galaxis középpontjához. Később a gravitációs lendítő hatás következtében a kettős pályáját átszelő csillagok kilöködnek (a fekete lyukak pálya menti sebességének megfelelő sebességgel). Az utolsó szakaszban, amikor a fekete lyukak távolsága annyira csökken, hogy a kibocsátott gravitációs hullámok hatásosan képesek csökkenteni a rendszer perdületét, a két fekete lyuk gyorsan összeolvad. Az összeolvadás időskálájától függően számos olyan galaxis létezését várhatjuk, amelyekben szupernagy tömegű kettős fekete lyukak találhatóak. Ezek a galaxis-összeolvadás különböző fázisairól tanúskodhatnak. Egyes elméletek szerint az összeolvadás során megnövekedő anyagbefogás (akkréció) „aktivizálhatja” az egyik vagy mindkét központi fekete lyukat és így akár kettős aktív galaxismagot (active galactic

nucleus, AGN) is megfigyelhetünk. Ezt vizsgálva hidrodinamikai szimulációk [19] azt mutatták, hogy szimultán aktivitás (tehát kettős AGN) az *összeolvadásnak* abban a szakaszában a legvalószínűbb, amikor a két mag távolsága $\sim 3000\text{--}30\,000$ fényév. Más modellek szerint [12] az összeolvadás legutolsó fázisában (3 fényévnél kisebb szeparációnál) az aktivitás átmenetileg leállhat, ahogy az elnyelhető anyagot kisöpri az aktív magba bespiráló fekete lyuk.

Az aktív galaxismagokat a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában már bemutattuk [7]. Emlékeztetőül az AGN sematikus modellje az *1. ábrán* látható. Az AGN központi energiaforrása egy *szupernagy tömegű* ($10^6\text{--}10^9$ naptömegnyi) fekete lyuk, amely körül akkréciós korong található. Erre a befogási korongra merőlegesen nagy energiájú anyagkilövellések (jetek) indulhatnak ki. Ezeket az aktív galaxismagokat szinkrotron eredetű, erős rádiósugárzás jellemzi. Az anyagbefogási korong alatt és felett gázfelhők helyezkednek el, amelyeket az optikai színekvonalai alapján széles és keskeny vonalas területre osztanak (broad line region, BLR és narrow line region, NLR). Színképelemzéssel megállapítható, hogy a BLR felhői gyorsan mozgó, sűrű, míg az NLR felhői lassúbb, ritkább objektumok. A központi energiaforrást körbeveszi egy árnyékoló portórusz is. A *rádiósugárzó* AGN-ek egyesített modellje szerint a megfigyelt sokféle típusú aktív galaxismag közti különbségek fő oka, hogy más-más szögben látunk rá az alapjában ugyanolyan felépítésű, korántsem gömbszimmetrikus objektumokra [18]. A rádiósugárzó blazárok (ide tartoznak például a BL Lacertae típusú aktív galaxismagok), kvazárok esetében a látóirány a kilövellés ten-

A munka a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatást az OTKA a K104539 projekt keretében támogatja.



1. ábra. Illusztráció a rádiósugárzó aktív galaxismagok modelljéhez [18].

gelyével nagyon kis szöget zár be, míg a rádiógalaxisok esetében a jetek közel az éggömb érintősíkjában helyezkednek el. (Az aktív galaxismagok jelentős része nem rádiósugárzó, és nem tudunk rádiókilövelést megfigyelni.)

Kettősök jelenlétére utaló „nyomok” és kettős AGN-ek megfigyelhetősége

Annak ellenére, hogy az elméleti megfontolások szerint számos feketelyukkettőst kellene látnunk, egyértelműen detektált kettősökből viszonylag keveset ismerünk. Habár jó néhány (az alábbiakban részletezett) tulajdonság magyarázható kettős SMBH-k jelenlétével, azok nagy része nem tekinthető egyértelmű bizonyítéknak, mivel mindegyiknél más, alternatív értelmezés is megállja a helyét. Jelen tudásunk szerint csak direkt észlelés esetén, tehát a kettős objektum tényleges térbeli felbontásakor jelenthetjük ki biztosan, hogy dupla SMBH-t tartalmazó objektumot találtunk. Értelemszerűen ez (elvileg) a legkönnyebben az elektromágneses hullámhossztartomány több sávjában is a normálisnál jóval nagyobb teljesítménnyel sugárzó aktív galaxismagok esetén valósítható meg. A gyakorlatban azonban jelenlegi műszereinkkel is csak a legközelebbi objektumokra és a relatíve nagyobb szeparáció esetén lehetséges a térbeli felbontás. Ez

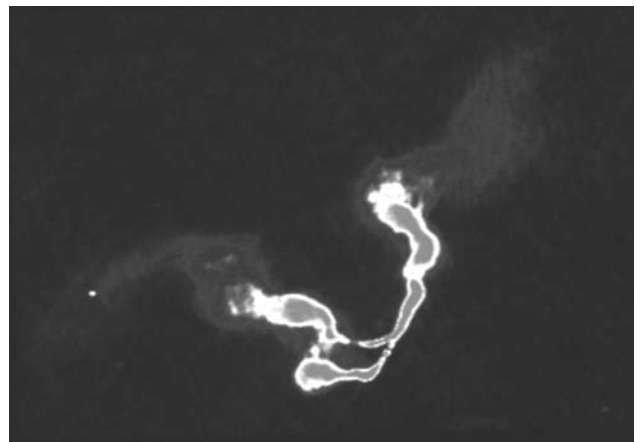
azt jelenti, hogy napjainkban néhány tucat olyan rendszert ismerünk, ahol a kettős szeparációja 30 és 30 000 fényév közti.

Röntgentartományban az NGC 6240 összeolvadó galaxisban sikerült felbontani a két aktív magot [11]. Ezek távolsága egymástól 4400 fényév, és összeolvadásuk a következő néhány százmillió évben várható. Hasonló, bár jóval nagyobb szeparációjú, éppen összeolvadó galaxisok magjában fedeztek fel aktív magokat ugyancsak röntgentartományban: az IC 694 és NGC 3690 aktív magjainak szeparációja ~15 000 fényév [1]; az ESO 509 és IG 066 magjai [9] még távolabb ~33 000 fényévre vannak egymástól. A 3C 75 jelű rádiógalaxisban szintén röntgenmegfigyelés szolgáltatotta az egyértelmű bizonyítékot a kettős jelenlétére (szeparáció ~24 000 fényév), habár a rádiótartományban feltérképezett különleges jetstruktúra (2. ábra) alapján ezt már korábban is felvetették [10].

A 2013 végén felbocsátandó *Gaia* űrszonda – amelynek elsődleges feladata milliárdnyi csillag helyzetének nagy pontosságú mérése [17], de emellett előreláthatólag közel ötszáz ezer aktív galaxismagot is meg fog figyelni – képes lesz arra, hogy a hozzánk közeli galaxisokban a látható fény tartományában felbontsa ezeket az objektumokat. A *Gaia* munkáját előkészítve rádió- és optikai tartományban is azonosított ismert kvazárok pozícióinak összehasonlításakor kiderült, hogy jó néhány esetben szignifikáns (az optikai mérések nagyobb hibahatárát meghaladó mértékű) eltérés tapasztalható a koordináták között [14]. Bizonyos esetekben lehetséges, hogy kölcsönható galaxisok összeolvadó magjai felelősek az optikai és rádiótartományban mért pozíciók közti különbséget.

A csillagászatban a jelenlegi legjobb felbontóképességet a nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) rádiócsillagászati megfigyelési módszer szolgáltatja. Ennek lényege, hogy egyszerre több, egymástól nagyon messze elhelyezett rádióantenna figyelni ugyanazt az égi objektumot. Az érzékelt jeleket rögzítik, majd később visszajátsszák és korrelálják (újabbán a modern adat-

2. ábra. A 3C75 jelű rádiógalaxis rádiótérképe, amely az amerikai Very Large Array hálózattal készült 20 cm-es hullámhosszon (Owen et al. *Astrophysical Journal* 294 (1985) 185).





3. ábra. Az X alakú 3C 403 rádiógalaxisnak az amerikai Very Large Array hálózattal készült rádióterképe 3,6 cm-es hullámhosszon. A kontúrvonalak az intenzitást jelölik (Capetti et al. *Astronomy & Astrophysics* 394 (2002) 39).

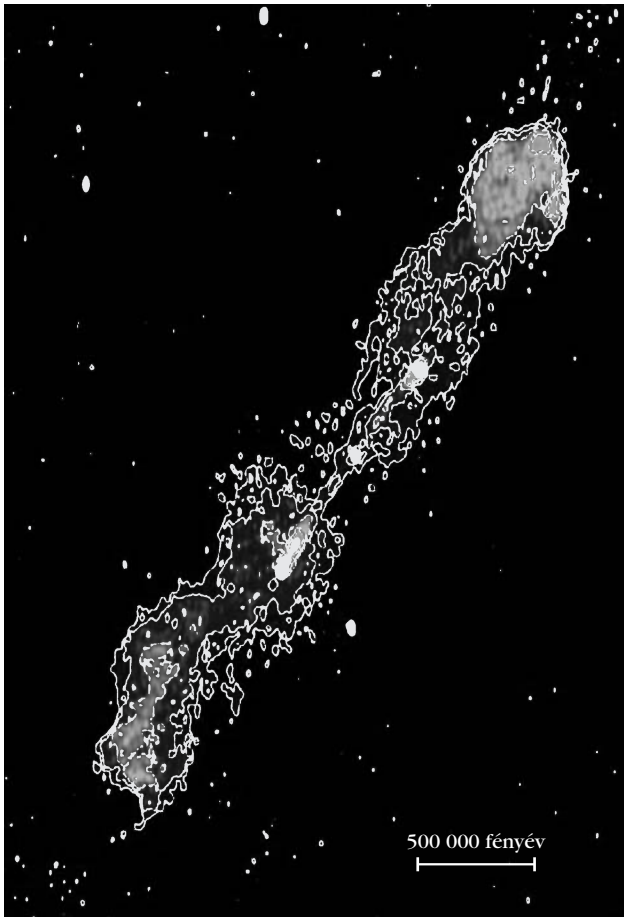
átviteli hálózatok révén mindegyik már valós időben is van lehetőség). Az ily módon elérhető felbontás sokszorosa a részt vevő antennák egyedi felbontóképességének; a felbontást a leghosszabb bázisvonal, azaz az antennák közötti legnagyobb távolság határozza meg. A rádióantennák összekapcsolt rendszere ebből a szempontból úgy működik, mint egyetlen hatalmas antenna, amelynek átmérője megegyezik a leghosszabb bázisvonal hosszával. A Földre telepített antennák hálózatával centiméteres hullámhosszakon ezred ívmásodpercnél is jobb felbontást lehet elérni.

Elvileg az optikai színképvonalak elemzésével is következtetni lehet kettős fekete lyukak jelenlétére, azonban – mint látni fogjuk – ez nem egyértelmű módszer, és a beazonosított kettős AGN-jelölteket további vizsgálatoknak kell alávetni. Egy AGN-hez tartozó NLR típusuk mérete néhány száz, esetleg ezer fényév. Amikor az összeolvadó AGN-ek még viszonylag messze, ~3000-30 000 fényévre vannak egymástól, a hozzájuk tartozó NLR-ek egymástól függetlenül léteznek. Mivel a két AGN közös tömegközéppont körül kering, a hozzájuk tartozó két NLR-nek – hacsak a keringési sík nem esik véletlenül éppen egybe az égbolt síkjával – különböző lesz a látóirányú sebessége. Az objektum színképében ezért a tipikusan NLR-hez köthető, többszörösen ionizált elemek (például a kétszeresen ionizált oxigén) színképvonalai megkettőzött csúccsal jelennek meg. Már közel ötezer ilyen dupla színképi csúcsot mutató keskeny vonalú AGN-t azonosítottak a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) hatalmas adatbázisának spektrumaiban [16]. Azonban a részletes vizsgálatok kimutatták, hogy a legtöbb esetben egyéb mechanizmusok felelősek a vonalak duplázódásáért. Például az NLR-rel kölcsönhatásba lépő, azt „megzavaró” jet hatására az NLR-t alkotó felhők két áttellenes irányban kifelé

tartó mozgása is okozhatja a színképvonalak megkettőződését, még akkor is, ha csak egyetlen AGN van a galaxis közepén. Így tehát a dupla csúcsú színképvonalakat mutató objektumok közül az „igazi” kettős AGN-ek kiválasztásában fontos szerepet játszik a korábban bemutatott nagy felbontású VLBI technika, amely lehetőséget ad a két AGN kilövelléseiből származó szinkrotronsugárzás detektálására és a két forrás térbeli felbontására – feltéve, hogy azok mindkettő a rádiósugárzó AGN-ek családjába tartoznak. Néhány esetben sikerült is rádiótartományban a két kompakt objektumot azonosítani, a megjósolt 10 000-20 000 fényév távolságra egymástól ([6] és ottani referenciák). Jelenleg is dolgozunk egy olyan VLBI-mérés kiértékelésén, ahol egy, az optikai spektrumvonalai alapján kettős AGN jelöltként azonosított forrást vizsgálunk.

Szintén a rádiótartományban megfigyelhető jetekhez kapcsolódnak olyan indirekt bizonyítékok, amelyek a múltban történt galaxis-összeolvadás, illetve galaxismagok közti kölcsönhatás jelenlétére (is) utalhatnak. Százas nagyságrendben ismerünk úgynevezett X alakú rádiógalaxisokat [3]. A képzeletbeli X szárait a hatalmas, kiterjedt jetek, illetve az azok által „fűjt” lebenyek, szárnyak (lobe, wing) alkotják, amelyekből nem a megszokott egy pár, hanem két pár található egy ilyen objektumban. A kilövelléspárok egymással nagy szöveget zárnak be (3. ábra). Fekete lyukak összeolvadásakor hirtelen bekövetkező spinátfordulást jósolnak az elméleti modellek [8]. Mivel a jetek a forgástengely irányában indulnak ki a fekete lyukak környezetéből, ezért logikusan következik, hogy a spin változásakor a kilövellés iránya is megváltozik. Ezen elképzelés szerint tehát az X alakú rádiógalaxisok korábban összeolvadt galaxismagok emlékét őrzik. Az egyik, energia-utánpótlását mostanra elvesztett és már halványodó lebenypár még az összeolvadás előtt, a másik az összeolvadás utánról datálódik, amikor a rendszer spinje megváltozott. Egy tavaly publikált, nagyobb mintán végzett vizsgálat azt mutatta [13], hogy az X alakú forrásokban átlagosan nagyobb (közel kétszer akkora) a központi fekete lyuk tömege, mint a hasonló fényességű „normál” rádiógalaxisokban, ami szintén azt támasztja alá, hogy ezek a források galaxisok összeolvadása révén jöhettek létre. Emellett a mintában vizsgálták azt is, mikor következett be a legutóbbi erős csillagkeletkezési korszak. Azt találták, hogy ez statisztikusan korábban (régebben) történt, mint a kontrollmintában. Ezen csillagkeletkezési korszak csúcspontja az X alakú galaxisok esetében mindig az aktív jetek megjelenése (azaz a feltételezett összeolvadás befejeződése) előtt történt 1-3 milliárd évvel. Ez az időskála jó egyezést mutat a galaxisok összeolvadását számítógépes szimulációval tanulmányozó kutatásokkal. (Az X alakú források egy másik magyarázat szerint viszont a csillagközi anyaggal való kölcsönhatás révén jöttek létre, és a visszaáramló anyag hozza létre a megfigyelt „szárnyakat”.)

Az úgynevezett dupla-dupla rádiógalaxisok kialakulásának egyik magyarázata is a galaxis-összeolva-



4. ábra. A B1545-321 dupla-dupla rádiógalaxis. A kép 2,4 GHz-en készült az Australia Telescope Compact Array-jel. (Forrás: Saripalli, Subrahmanyan és Shankar.)

dás. Ezeknél a forrásoknál szintén duplán jelennek meg a páros lebenyek, de – az X alakú forrásoktól eltérően – azok az égbolton egy tengely mentén helyezkednek el (4. ábra). A rádiótérképek szerint azonban az egyes lebenyeket nem kötik össze folytonos kilövellések. Ennek oka valószínűsíthetően a leállt, majd később újraindult jetaktivitás lehet. A korábbi kilövellés a távolabbi alakzatokat hozta létre, majd egy átmeneti „szünet” után az aktivitás és a kilövellések újra megjelentek, de azoknak még nem volt elég idejük, hogy elérjenek a régebben kialakult külső struktúrákig (lebenyekig). Ezt a jelenséget okozhatja – a már a bevezetőben említett módon – az, hogy a két fekete lyuk összeolvadásának utolsó fázisában „kisöpri” a bespiráló fekete lyuk a társa körül felgyülemlett befogható anyagot, így átmenetileg „kikapcsolva” annak aktivitását. Meglehet, hogy a dupla-dupla rádióforrások és az X alakúak eredete hasonló, csak az előbbieken az X alakra éppen az éléről látunk rá [5] és ottani referenciák).

Bizonyos blazárok jetjeinek látszó irányában megfigyelhető, periodikusnak tűnő változásait is összefüggésbe hoznak kettős, immár nagyon kis szeparációjú fekete lyukak jelenlétével. A jetek mozgási irányában nagyjából rendszeresen bekövetkező változást – amely általában a rádiójet spirálvonalyszerű

alakjaként figyelhető meg nagy felbontású VLBI-térképeken – okozhatja a kilövellés precessziós mozgása. Ez felléphet a nyalábot nagy sebességgel kibocsátó fekete lyuknak a kettős közös tömegközéppontja körüli keringése, az anyagbefogási korong precessziója miatt, amelyet a másik fekete lyuk gravitációs tere idéz elő.

Természetesen a fekete lyukak összeolvadásáról szóló egyetlen cikk sem lehet teljes a gravitációs hullámok említése nélkül. A szupernagy tömegű fekete lyukak kettős rendszere gravitációshullám-forrás. Az általuk keltett jelek észlelésére azonban csak az űrben működő eLISA (evolved Laser Interferometer Space Antenna, továbbfejlesztett lézer-interferométeres űr-antenna) rendszer lesz képes [15]. Az eredetileg LISA néven indult közös amerikai–európai űrprojekt, amelyből az amerikai fél 2011 folyamán szállt ki, jelenleg az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) 2028-ban felbocsátandó nagyobb űreszközöltjei között verseng a megvalósítás lehetőségéért [4]. Sikere esetén az elektromágneses hullámhosszakon kívül egy új tartományban is megfigyelhetővé válna a galaxismagok összeolvadása. Az eLISA-val így nemcsak az aktív galaxismagok, hanem az összes milliárd naptömegű fekete lyuk fejlődése és összeolvadásának fázisai is tanulmányozhatóvá válnak, térben és időben sokkal távolabbi objektumok esetében, mint amiket jelenleg az elektromágneses hullámhossztartományban megfigyelhetünk.

Összefoglalás

A kettős, szupernagy tömegű fekete lyukak keresése a csillagászat egyik kedvelt kutatási területe napjainkban. Jelen elképzelésünk szerint az Univerzum nagyskálás szerkezetének kialakulása hierarchikusan, kisebb struktúráktól a nagyobbak felé haladva ment végbe. A galaxisok is számos ütközés és összeolvadás során alakulhattak ki. Miközben egyes elméleti számítások arra az eredményre jutnak, hogy bizonyos kezdeti feltételek esetén akár az Univerzum egész eddigi élete sem elég ahhoz, hogy két SMBH véglegesen összeolvadjon (tehát azt várjuk, hogy számos kettős SMBH-t tudjunk detektálni), mégis szinte alig detektálunk kettősöket. A képet természetesen az is nagyban árnyalja, hogy a galaxisok és galaxismagok összeolvadásának pontos időskálája sem ismert, valamint, hogy jelenlegi műszereinkkel csak a kozmikus térben és időben közeli forrásokat vagyunk képesek felbontani. Ezzel szemben az elfogadott kozmológiai modell szerint a galaxisok ütközései az Univerzum történetének korábbi szakaszaiban jóval gyakrabban következhetnek be. A direkt mérések hátránya, hogy környezetünknek (egyelőre) csak egy nagyon szűk tartományát vizsgálhatjuk, valamint csak olyan forrásokat, ahol mindkét mag aktív. Ez a két feltétel erős határt szab a megszerelhető tudásnak, mivel nagyon erős kiválasztási effektust hordoz. Sajnos jelenleg nem ismerünk olyan in-

direkt mérési bizonyítékot, amely egyértelműen bizonyítaná a kettős fekete lyuk jelenlétét. Az itt bemutatott összes megfigyelt jelenségre (akár több) alternatív magyarázat is létezik. Ezért kiemelkedően fontos olyan jellemző tulajdonság keresése, amellyel egyértelműen azonosíthatók a kettős AGN-ek. Így ugyanis felállítható lenne egy nagyobb, statisztikus módszerekkel is tanulmányozható minta, ami nagymértékben elősegítené a galaxisok és az Univerzum fejlődésének kutatását, valamint többet tudnánk meg a szupernagy tömegű fekete lyukak és kettősök életútjáról is. Számos elmélet veti fel, hogy kapcsolat lehet a galaxisaktivitás, a rádiósugárzó kilövellések megléte és az adott galaxis életútja, ütközési története között. A kettős galaxismagokat és összeolvadásukat tanulmányozva talán olyan régóta megválaszolatlan kérdések megoldásához is közelebb jutunk, hogy miért vannak a rádiótartományban halk (és jet nélküli) AGN-ek többségben, miért $z = 2$ vöröseltolódásnál látjuk a kvazárok többségét, minden galaxis átment-e egy aktivitási fázison élete során, és vajon meddig tart egy tipikus aktivitási szakasz?

Irodalom

1. Ballo, L. et al.: Arp 299: A Second Merging System with Two Active Nuclei? *Astrophysical Journal* 600 (2004) 634.
2. Begelman, M. C. et al.: Massive black hole binaries in active galactic nuclei. *Nature* 287 (1980) 307.
3. Cheung, C. C.: First “Winged” and X-Shaped Radio Source Candidates. *Astronomical Journal* 133 (2007) 2097.
4. eLISA honlap www.elisascience.org
5. Frey S.: Kettős aktív galaxismagok. *Meteor csillagászati évkönyv* 2012 280.

6. Frey S. et al.: Two in one? A possible dual radio-emitting nucleus in the quasar SDSS J1425+3231. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425 (2012) 1185.
7. Gabányi K. É.: Kvazárok gyors fényességváltozásai rádiótartományban. *Fizikai Szemle* 59 (2009) 354.
8. Gergely L. Á., Bierman P. L.: The Spin-Flip Phenomenon in Supermassive Black hole binary mergers. *Astrophysical Journal* 697 (2009) 1621.
9. Guainazzi, M. et al.: The early stage of a cosmic collision? XMM-Newton unveils two obscured AGN in the galaxy pair ESO509-IG066. *Astronomy & Astrophysics* 429 (2005) L9.
10. Hudson, D. S. et al.: X-ray detection of the proto supermassive binary black hole at the centre of Abell 400. *Astronomy & Astrophysics* 453 (2006) 433.
11. Komossa, S. et al.: Discovery of a Binary Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy NGC 6240 Using Chandra. *Astrophysical Journal* 582 (2003) L15.
12. Liu F. K.: X-shaped radio galaxies as observational evidence for the interaction of supermassive binary black holes and accretion disc at parsec scale. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 347 (2004) 1357.
13. Mezcuca, M. et al.: Starbursts and black hole masses in X-shaped radio galaxies: Signatures of a merger event? *Astronomy & Astrophysics* 544 (2012) A36.
14. Orosz G., Frey S.: Optical–radio positional offsets for active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics* 553 (2013) A13.
15. Rác I.: Hogyan hallgatható meg az Univerzum zenéje? *Természet Világa* 142/12 (2011) 546.
16. Smith, K. L. et al.: A Search For Binary Active Galactic Nuclei: Double-peaked [O III] AGNs In The Sloan Digital Sky Survey. *Astrophysical Journal* 716 (2010) 866.
17. Szabados, L.: Gaia – a következő évtized nagy űrcsillagászati projektje in *Űrcsillagászat Magyarországon*. Konkoly Observatory of the Hungarian Academy of Sciences Monographs No. 6. (2010) 74.
18. Urry, C. M., Padovani, P.: Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 107 (1995) 803.
19. van Wassenhove, S. et al.: Observability of Dual Active Galactic Nuclei in Merging Galaxies. *Astrophysical Journal* 748 (2012) L7.

KÉPALKOTÁS SOK SZÁZ GIGA- ÉS TERAHERZ FREKVENCIATARTOMÁNYBAN

Földesy Péter
MTA TTK MFA

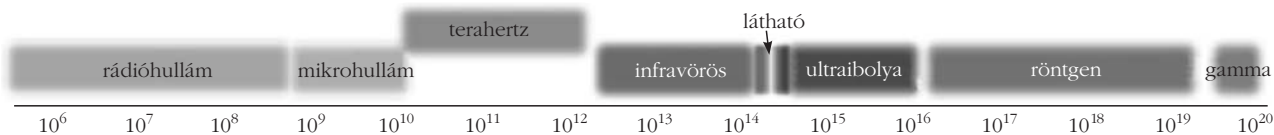
A THz-es frekvenciatartományba eső sugárzás rutinszerű létrehozása, érzékelése és használata csupán két évtizedes ága a tudománynak. Ez a sugárzási tartomány láthatatlan számunkra és a mikrohullámok és az infravörös sugárzás közötti résben helyezkedik el (1. ábra). Általános gyakorlat szerint ez a 300 GHz-től 3 THz-ig terjedő frekvencia-, vagy máshogy megfogalmazva a $3\text{--}100\text{ cm}^{-1}$ hullámszámtartomány. A THz-es sugárzás egyik divatosabb elnevezése például a T-rays.

A tartomány – pont a „köztes” jellege miatt – különleges helyzetben van. A hagyományos rádiófrekvenciás eszközök már nem képesek kezelni a klasszikus RF megoldásokkal, míg a fotonok kis energiája miatt (meV) az infravörös technológiákhoz (például bolometrikus kamerák) túl „hideg” ez a sugárzási tar-

tomány. Első alkalmazási területe a rádiócsillagászatban és a földfelszín műholdas felderítésében volt.

A nehézségek ellenére miért érdekes az ilyen új eszközök fejlesztése? Azért, mert használata biztonságos, nem ionizáló sugárzás, non-invazív és nem destruktív. Számos közönséges anyag (például műanyag-csomagolás, ruházat) és élő szövet vékony rétege átlátszó vagy közel átlátszó ezeken a hullámhosszakon és fontos összetevői egyedi spektrális ujjlenyomattal bírnak. Ez az információtartalom képként is létrehozható, azonosítható és analizálható. Ezáltal nem destruktív anyagvizsgálatra alkalmas úgy, hogy gyorsabb képalkotást tesz lehetővé, mint a röntgentechnika, valamint a képek belső kémiai és más jellegű tartalmakat is képesek szolgáltatni. Ezekben a spektroszkópiai alkalmazásokban – akár 3 dimenzióban – olyan egyedi spektrális ujjlenyomatokat lehet azonosítani, ami más technikával körülményes vagy nem megismerhető (például robbanóanyagok jelenléte zárt bőröndben). Ezek miatt a THz-es képalko-

A 2013. évi Magyar Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott változata.



1. ábra. A terahertzes sugárzás elhelyezkedése az elektromágneses spektrumban a frekvencia (Hz) függvényében.

tást gyakori kiegészítő technikaként alkalmazzák optikai, Raman- vagy infravörös vizsgálatokban. Gyakran említett és vitatott felhasználási kör a repülőtéri „body scannerek”. De meg kell említeni az alkalmazások kommunikációtechnológiai oldalát is. A nagyobb adatátvitel eléréséhez kézenfekvő megoldás a minél nagyobb vivőfrekvencia használata. A 275–3000 GHz tartomány jelenleg nincsen allokálva egyetlen konkrét kommunikációs csatornához sem, ezért is fokozott az érdeklődés a jövő wireless hálózatainak tervezésekor, ahol a 100 Gb/s átvitel sem elképzelhetetlen. Számos előnye mellett azonban a légköri elnyelés jelentőssé válik 500 GHz fölött, ami behatárolja a kommunikációs távolságot. Ezzel együtt az úgynevezett piconetworkök, azaz szobán belüli gyors adatátviteli alkalmazások hamarosan mindennapos eszközökké válhatnak. A *Nature Photonics* folyóirat részletes összefoglalót jelentetett meg a frekvenciatartomány érdekességeiről [1].

A THz-es technológiák térnyerésének érdekes módon nem a detektorok szabnak határt, hanem a „megvilágítás”. Mivel a légkör erősen csillapítja a nap ilyen tartományú sugárzását, nem számíthatunk érdemi háttér-megvilágításra. Több egzotikus megoldáson kívül a következő alapvető fényforrások állnak rendelkezésre:

- Elektronikus, kisfrekvenciájú oszcillátor jelének felkeverése nemlineáris elektronikai elemekkel.
- Optikai, két egymáshoz nagyon közeli hullámhosszú lézer fényének nemlineáris keverése, amelyben a két hullám különbségi frekvenciája jelenik meg és esik a THz-es régióba.
- Rövid, femtoszekundumos lézerimpulzusok intenzitásburkolójának átalakítása szélessávú THz-es pulzussá.
- Natív THz-es frekvenciájú lézerek, az úgynevezett QCL – quantum cascade laser.

Míndegyik megoldásnak vannak előnyei (a fenti sorrendben: kis méret; olcsó és spektroszkópiára alkalmas; azonnali spektrális információ; nagy fényintenzitás) és hátrányai (sorban: 1 THz-hez közeledve elenyésző intenzitás; nagyon kis intenzitás; rendkívül drága és körülményes szerkezet; kriogénikus folyékonyhélium-hűtés). Elmondható, hogy mW feletti átlagos teljesítmény már igen jónak számít.

Hazai vonatkozások

Hazánkban a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetében a spektroszkópiai alkalmazásnak, pontosabban a nagy energiájú impulzusforrások létrehozásának van komoly hagyománya és nemzetközi elismertsége [2, 3]. A THz-es spektrális vizsgálatok széleskörű terjesztését a fentebb említett femtoszekundumos

lézereken alapuló források megjelenése tette lehetővé. Ezek közé tartozik egy nemlineáris optikai folyamaton, az optikai egyenirányításon alapuló THz forrás is, amellyel igen rövid, akár egyetlen oszcillációs ciklusból álló THz-es impulzus kelthető. Mivel a pulzus időtartománya igen keskeny, a frekvenciatartalma nagyon széles (0,1–3 THz).

A folyamatos üzemű, vagy keskeny frekvenciasávú elektronikus felkeverésen alapuló képalkotás és detektorfejlesztés egy hazai nagy értékű OTKA kutatási pályázattal egy MTA-SzTAKI, MTA-TTK-MFA, BMGE, PTE konzorciumban kezdett kibontakozni az utóbbi négy évben, amely eszközeit tekintve az MTA-SzTAKI-ban összpontosult, majd az MTA-TTK-MFA-ba költözött.

Érzékelés tervezérlésű tranzisztorral

Számos módja lehet az antennák által összegyűjtött nagyfrekvenciás jel egyenirányításának. Ilyen lehetőségek a kriogénikusan hűtött szilícium, germánium, vagy InSb kompozit bolométerek, nagy sebességű, kis méretű GaAs Schottky-diódák, gázkamrás Golay-cella. Ezekre a megoldásokra jellemző a nagy érzékenység és jó jel-zaj viszony, azonban integrálhatóságuk korlátos és nem alkalmasak gyors, szobahőmérsékletű képalkotásra.

Egy érdekes jelenség azonban lehetővé teszi, hogy közönséges, integrált áramkörök alapjaként szolgáló tervezérlt szilíciumtranzisztorok is érzékenyek legyenek erre a frekvenciatartományra. Mindez annak elenire lehetséges, hogy csak a legmodernebb technológiájú 20-30 nm-es csíkszélességű tranzisztorok üzemi frekvenciája közelíti meg a fél THz-et. A lehetőség, hogy komerciális CMOS vagy GaAs technológiával THz-es érzékelőt lehet készíteni, megnyitotta az utat olcsó, relatíve nagy felbontású, videósebességű kamerák létrehozására is [4].

A detektálási jelenség a tranzisztorok csatornájában kialakuló 2D elektronplazma kis reakcióidején alapul. *Dyanokov* és *Shur* [5] megjósolta az elektrongázra felállított folyadékmodellel, hogy az elektronplazma instabilitása és modulációja alkalmassá teheti a tervezérlésű tranzisztorokat arra, hogy extrém nagyfrekvenciás érzékelőként viselkedjenek. Egy másik, fenomenologikus megközelítés szerint a mikrohullámú tranzisztoros teljesítményérzékelők rezisztív self-mixing technikája terjeszthető ki a nagyobb frekvenciákra [6] a 2D elektrongáz segítségével.

A gyakorlatban két alapvető érzékelési esetet lehet megkülönböztetni attól függően, hogy az elektronplazma rezonanciája bekövetkezik-e vagy nem. A tranzisztor csatornájában kialakuló és zárt 2D elektrongáz rezo-

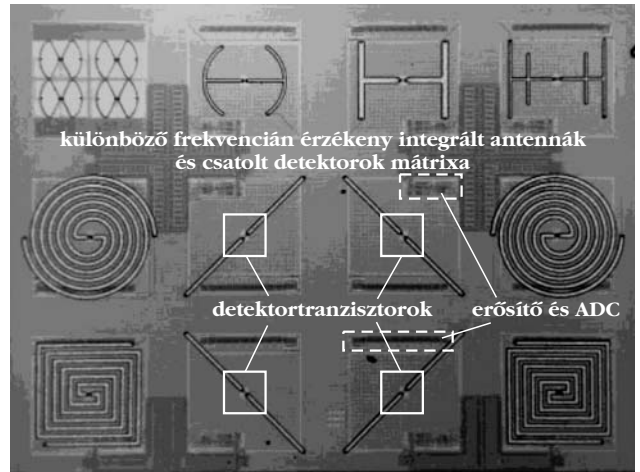
nanciafrekvenciája fordítottan arányos a csatorna hosszal és szubmikron nagyságrendben eléri a THz tartományt. Az elektron-gáz nemlineáris jellege miatt a csatornában így rezonancia esetén érzékelhető és mérhető DC-jel alakul ki. Kriogénus körülmények között ez a rezonáns detekció könnyen demonstrálható.

Szobahőmérsékleten azonban a plazma oszcillációja túlcillapítottá válik, elveszti frekvencia-specifikusságát és a tranzisztor szélesávú, de továbbra is érzékeny érzékelővé válik. Ezt a működési módot tudjuk kihasználni integrált áramkörök esetében, ahol a sugárzás csatolása a mikrométer alatti tranzisztorokra planáris antennákkal történik. Ezek az integrált antennák minden szempontból hasonlóak a „kisfrekvenciás” (például wifi) megvalósításokhoz, csupán méretük arányosan kisebb és a pár száz mikrométer nagyságrendbe esik.

Az MTA-SzTAKI és MTA-TTK-MFA-ban folyó kísérletek

A kutatás során az elsődleges cél olyan integrált áramkör kifejlesztése volt, amely nagyfrekvenciás érzékelést és képkalkotást tesz lehetővé. A következőkben bemutatásra kerülő érzékelő tömb összesen tizenkét antenna-érzékelő párt és jelfeldolgozó adatútvonalat tartalmaz. Minden detektor saját erősítővel és analóg-digitális átalakítóval rendelkezik, majd a digitális utófeldolgozásért egy integrált processzor felelős, amely összességében egy sokcsatornás digitális lock-in erősítőt valósít meg. A rendszert TSMC gyártású CMOS 90 nm-es technológiával készítettük el. Ellentétben a monokróm kamerákkal, megvizsgáltuk azt, hogy széles frekvenciasávban miként lehet integrált antennákat létrehozni úgy, hogy a közel 200 GHz-től 750 GHz tartományban lehessen képeket készíteni. Ennél magasabb frekvenciákon a rendelkezésünkre álló sugárforrás nem megfelelő, de több THz feletti működést is demonstráltak már hasonló technológiával.

Mérnöki szempontból számos nehézséget kellett megoldani. Az első és legfontosabb probléma a detektorok érzékenységből és a kis sugárzási jelszintből fakad. A hasznos és mérhető jel nagyságrendje μV – mV . A detektorok érzékenysége a tranzisztor lezárási tartományában a legnagyobb, a detektor kimenő ellenállása több száz $\text{k}\Omega$ és gyakran $\text{M}\Omega$ nagyságrendű. Ebből fakadóan elkerülhetetlen integrált nagy erősítésű és kis bemenő kapacitású erősítő használata. A nagy kimeneti ellenállás eredményeként a detektor beállási ideje nagy, ezért a zajnyomás miatt alkalmazott moduláció és lock-in erősítő működési frekvenciája is korlátozott (0,1–20 kHz). További nehézségként ebben a kis modulációs frekvenciatartományban az áramkörök 1/f flickerzaja jelentőssé válik. Szerencsés módon azonban a detektoron nem folyik DC-áram, azaz csupán a csatorna-ellenállás hőzajával kell számolnunk és az áram okozta flicker- és sörétzaj elhanyagolható. A mért zaj nagysága tipikusan néhány $\text{nV}/(\text{Hz})^{0.5}$ -tól $\mu\text{V}/(\text{Hz})^{0.5}$ értékig változik. A következő kihívás a sugárzás csato-

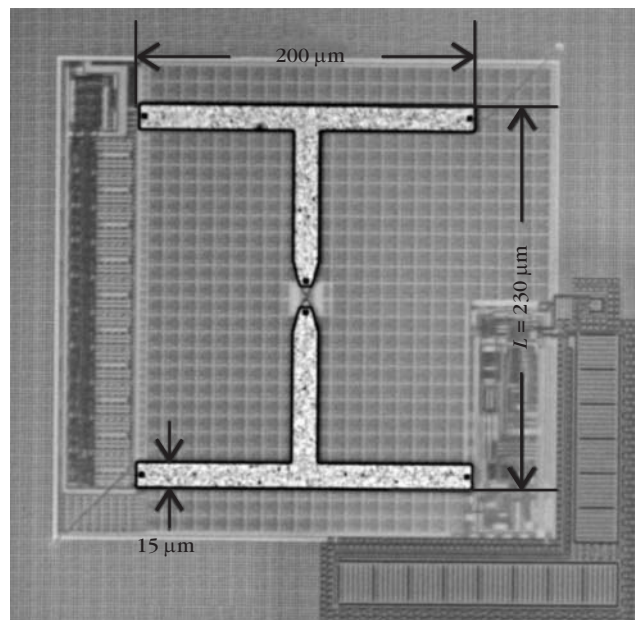


2. ábra. 0,22–0,75 THz-en működő érzékelőtömb integrált antennákkal, erősítő áramkörökkel és digitális jelfeldolgozással.

lása a detektorokhoz. Mivel a standard szilíciumtechnológiák hordozója adalékolt, ezért magas a közvetlenül a felületre épített antennák vesztesége és a használható fémek száma, vastagsága, a szigetelő dielektrikum anyaga adott és nem változtatható. Megoldásként a legmagasabban található fémmezést használtuk és a szilíciumhordozót a legközelebb lévő fémmel árnyékoltuk. Eredményként rezonáns, keskenysávú antennákat kaptunk. Végül, mint minden analóg és digitális kevert jelű áramkör esetén, az integrált áramkörön belüli zajszigetelést árnyékolással és szeparált digitális területtel növeltük meg. Az elkészült áramkör 4×3 szenzort tartalmazott (2. ábra).

Egy szenzorban az antennacsatolt detektort alacsony zajú erősítő és analóg-digitális átalakító követte. Az elektronika és detektorszerkezet azonos, azonban különböző típusú antennák kerültek különböző szenzorokba: spirális, csokornyakkendő, és különféle

3. ábra. Integrált áramkör felületére kialakított antenna és jellemző méretei (360 GHz csúcserzékenységgel). Az antennaágak metszéspontjában helyezkedik el az érzékelő tranzisztor.



ni a detektorokhoz. A spirál antennapár képes különbséget tenni a cirkulárisan polarizált sugárzás irányultsága, azaz jobb- vagy balkezes esetek között.

A koherens sugárzásnak köszönhető további lehetőség a fázis megmérése egy referenciasugárhoz képest, az interferenciámintázat rögzítése. Ilyen méréssel a tárgy felszínének alakját, vagy átmenő képalkotáskor például homogén tárgy vastagságát lehet meghatározni. A két módszer együttes alkalmazása részletesen megtalálható a [7] cikkben. Végül alapkutatói eredményként [8] cikkünk bemutatja, hogy egyetlen detektorral és egy keresztben elhelyezett antennapárral is el lehet végezni a fenti méréseket, ezzel kompakttá téve a fejlesztés alatt álló mérőrendszert. A <http://www.analogic.sztaki.hu> oldal áttekintést ad a teljes kutatási témáról.

Összefoglalás

A cikk röviden áttekintette a THz és THz alatti frekvenciatartomány alkalmazásának néhány jellemzőjét, valamint azt, hogy szilícium alapú integrált áramkörü

megoldással lehetséges ilyen tartományú intelligens érzékelőket készíteni. Láthattuk, hogy egy saját tervezésű integrált áramkör képes modulált sugárzás érzékelésére, demodulációjára és autonóm módon, digitálisan szűrt eredmény szolgáltatására.

Irodalom

1. M. Tonouchi: Cutting-edge THz technology. *Nature Photonics* 1/2 (2007) 97–105.
2. <http://physics.ttk.pte.hu/kutatas/THz.shtml>
3. J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, M. C. Hoffmann, J. Hebling: Towards generation of mJ-level ultrashort THz pulses by optical rectification. *Opt. Express*. 19 (2011) 15090.
4. R. Courtland: A cheap THz camera. *IEEE Spectrum* (2012), 17. April, elektronikus kiadás.
5. M. I. Dyakonov, M. S. Shur: Plasma wave electronics: Novel THz devices using two dimensional electron fluid. *IEEE Transactions on Electron Devices* 43 (1996) 1640–1645.
6. E. Öjefors, U. Pfeiffer, A. Lissauskas, H. Roskos: A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology. *IEEE Journal of Solid-state Circuits* 44/7 (2009) 1968–1976.
7. P. Földesy: THz single-shot quadrature phase-shifting interferometry. *Optics Letters* 37/19 (2012) 4044–4046.
8. P. Földesy: Current steering detection scheme of three terminal antenna-coupled THz field effect transistor detectors. *Optics Letters* 38/15 (2013) 2804–2806.

MOLEKULÁRIS SZINTŰ ESZKÖZÖK SZEREPE NAPJAINKBAN

Csehi András, Halász Gábor

Debreceni Egyetem, Információ Technológia Tanszék

Vibók Ágnes

Debreceni Egyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Köztudott, hogy a molekulák pozitív töltésű nehéz atommagokból és a magok terében mozgó könnyű elektronokból épülnek fel. Az alapvető kölcsönhatások közül az elektromágneses kölcsönhatás játszik domináns szerepet belső szerkezeti felépítésükben. Míg az elektronok elemi részecskék, az atommagot alkotó protonok és neutronok további alkotórészekre bonthatók. Ezen szubatomi részecskék világa már az atommag- és részecskefizika tárgykörébe tartozik, ahol az elektromágneses kölcsönhatás helyett a gyenge és erős kölcsönhatások dominálnak. A molekulák világából a nagyobb mérettartományok felé kilépve pedig az tapasztalható, hogy a klasszikus fizika törvényszerűségei kezdenek érvényesülni, az elektromágneses kölcsönhatás mellett a gravitáció jelentősége egyre nő.

Sok molekulából álló rendszerek vizsgálatok (például oldatok) a klasszikus fizikai leírás még nagyon jó közelítésnek bizonyul, azonban ha a moleku-

lák belső szerkezetére vagyunk kíváncsiak, a megfelelő pontosság érdekében elengedhetetlen a kvantummechanikai megközelítés. Az elektronok és magok mérettartományában olyan effektusok lépnek fel, amelyek a klasszikus fizika eszköztárával értelmezhetetlenek.

A kvantummechanika 1925-ös megszületését követően robbanásszerű változások következtek az atomi részek fizikájában. Kiderült, hogy a kötött stacionárius kvantumrendszerek csak jól meghatározott állapotokban létezhetnek, diszkrét energiaspektrummal rendelkeznek, amelyek a rendszert jellemző időtől független Schrödinger-egyenlet megoldásával kaphatók meg. Néhány egyszerű esettől eltekintve (így a molekulák esetében is) a Schrödinger-egyenlet analitikusan nem oldható meg. Az elmúlt két évtized ugrásszerű számítástechnikai fejlődése következtében azonban már viszonylag nagy rendszerek numerikus megoldása is hatékonyan kivitelezhetővé vált.

Az elméleti leírás eszköztárának bővülésével párhuzamosan a kísérleti apparátus is óriási fejlődésen ment keresztül, elegendő ha csak a spektroszkópiai módszerek kifinomulására és a lézerek fejlődésére gondolunk. A molekulákban lejátszódó magdinamikai folyamatok szabályozásáért és monitorozásáért *Ab-*

A 2013. évi Magyar Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott változata.

Az írás a TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0001 projekt keretében valósult meg az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával.

med Zewail 1999-ben Nobel-díjat kapott (pumpapróba-kísérlet kidolgozása). A molekulán belüli elektronok dinamikájának megfigyelése pedig az attoszekundumos lézerek megjelenésével válik lehetővé.

Napjainkra tehát mind az elméleti, mind pedig a kísérleti eszközök eljutottak arra a szintre, hogy a molekulák szabályozott deformációja, orientációja, dinamikai viselkedése szimulálhatóvá és kivitelezhetővé vált, mintegy teret nyitva ezzel a molekuláris szintű eszközök fejlődésének.

Elméleti háttér

A molekulák elméleti kvantummechanikai vizsgálata az 1927-ben kidolgozott Born–Oppenheimer (BO) közelítésen alapul [1]. A közelítés lényege a következő: mivel az atommagok tömege 3–4 nagyságrenddel nagyobb az elektronokénál, ezért a magok sokkal lassabban mozognak az elektronoknál, így a két részecskerendszer mozgása szétválasztható. Ez annyit jelent, hogy a teljes rendszer (magok + elektronok) stacionárius Schrödinger-egyenlete szeparálható, külön az elektronrendszer és külön a magrendszer Schrödinger-egyenletére. Belátható, hogy az elektron Schrödinger-egyenlet sajátenergiái játszik a potenciális energia szerepét a magok Schrödinger-egyenletében.

A BO közelítés keretében tehát megoldjuk az elektron Schrödinger-egyenletet a magok sok-sok rögzített elrendeződése esetén és a kapott sajátenergiákat az adott geometriai pontokhoz rendeljük. Ezáltal a magkoordináták számával megegyező dimenziójú potenciálisenergia-felületeket kapunk a magkoordináták függvényeként (az alapállapot és a kívánt számú gerjesztett állapot felületeit). Mivel ezek a felületek szerepelnek potenciális energiaként a magok Schrödinger-egyenletében, a magok dinamikájának vizsgálata során rajtuk történik a maghullámfüggvények időbeni propagálása (fontos megjegyezni, hogy a magok dinamikájának kvantumos leírása elkerülhetetlen, kváziklasszikus módszerek nem adnak pontos választ, hiszen az alább részletezendő molekuláris kapcsolók elektronállapotainak kereszteződése erős kvantummechanikai effektust eredményez a rendszerben).

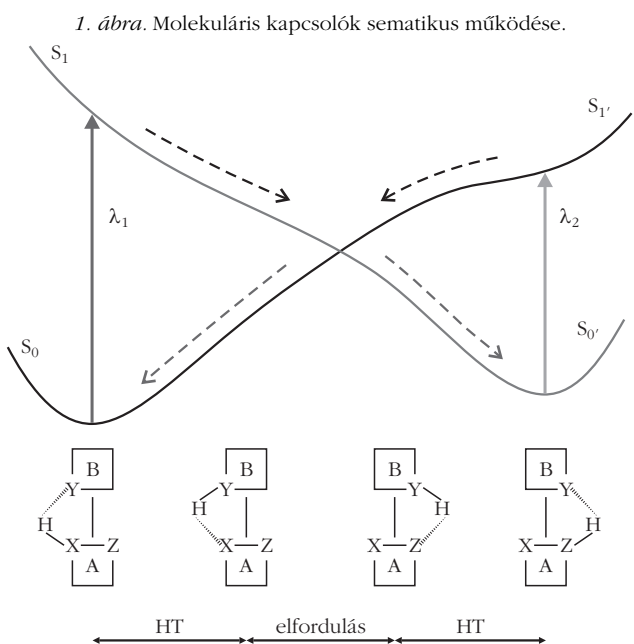
A szimulációk során két fő kihívással kell megbirkózni: (i) Az atommagok dinamikája nagyon érzékeny az imént említett potenciális energiafelületek minőségére, ezért az elérhető legpontosabb elektronenergiákat kell meghatároznunk nagy számú geometriai elrendeződéshez. Ezek számításához ma már számos kvantumkémiai programcsomag áll rendelkezésünkre (MOLPRO [2], TURBOMOLE [3], GAUSSIAN [4] stb.). (ii) Nehézséget okoz, hogy sokatomos rendszerekben a szabadsági fokok nagy száma miatt a hullámfüggvény integrálása túlságosan időigényes. A magdinamika meglehetősen pontos leírását adja a Heidelbergi Egyetemen kifejlesztett és széleskörben alkalmazott MCTDH (Multi-Configuration Time-Dependent Hartree) módszer [5], amely akár 25–30 szabadsági fokkal rendelkező rendszerek leírására is alkalmas egyszerre több, csatolt

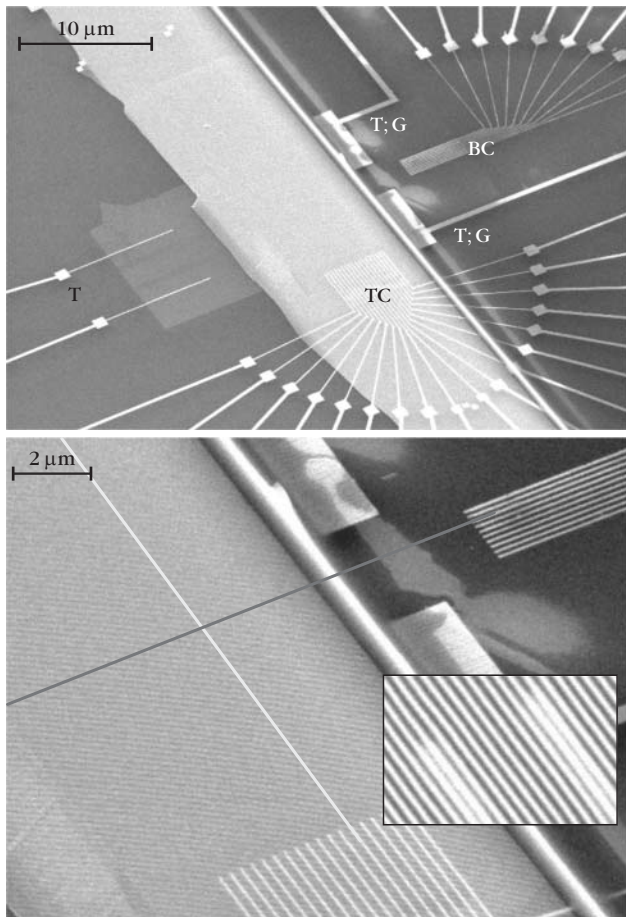
(egymást keresztező) energiafelületen. Ennél nagyobb rendszerek (óriásmolekulák vagy környezetbe ágyazott kisebb molekulák) dinamikai leírása is megvalósítható a 2005-ben kidolgozott három effektív módus módszer [6] segítségével, amely a jellemző releváns szabadsági fokok mellett három effektív szabadsági fokkal veszi figyelembe a rendszer többi részét.

Molekuláris eszközök

A legegyszerűbb molekuláris eszköz egy olyan molekula, amely két stabil izomerrel rendelkezik és ezen stabil állapotok között szabályozott módon valamilyen külső hatással (lézertérrel történő besugárzás, elektromosság alkalmazása stb.) oda-vissza billenthető. Az ilyen tulajdonságú rendszereket molekuláris kapcsolóknak nevezzük [7]. A bistabilitás mellett fontos elvárás még a kapcsoló molekulákkal szemben, hogy többszöri besugárzás (kapcsolás) hatására se disszociáljanak. Működésüket sematikusan az 1. ábra mutatja be [8]: a bal oldali izomert λ_1 hullámhosszú lézertel megvilágítva a rendszer alapállapotból gerjesztett állapotba kerül, majd pedig a gerjesztett állapot energiefelületén az ott jelen lévő gradiensviszonyoknak megfelelően elindul a hullámcsomag vándorlása, miközben a molekula geometriája ennek megfelelően deformálódik. Jelen példában kezdetben egy hidrogénatom vándorol az A molekularész X atomjától a B molekularész Y atomjához, miközben a rendszer hullámcsomagja elindul a lejtőn lefelé. Az A és B rész 180 fokos elfordulása után egy újabb hidrogéntranszferrel (HT) a hidrogénatom visszakerül az A-ra, de már annak Z atomjához kötődve.

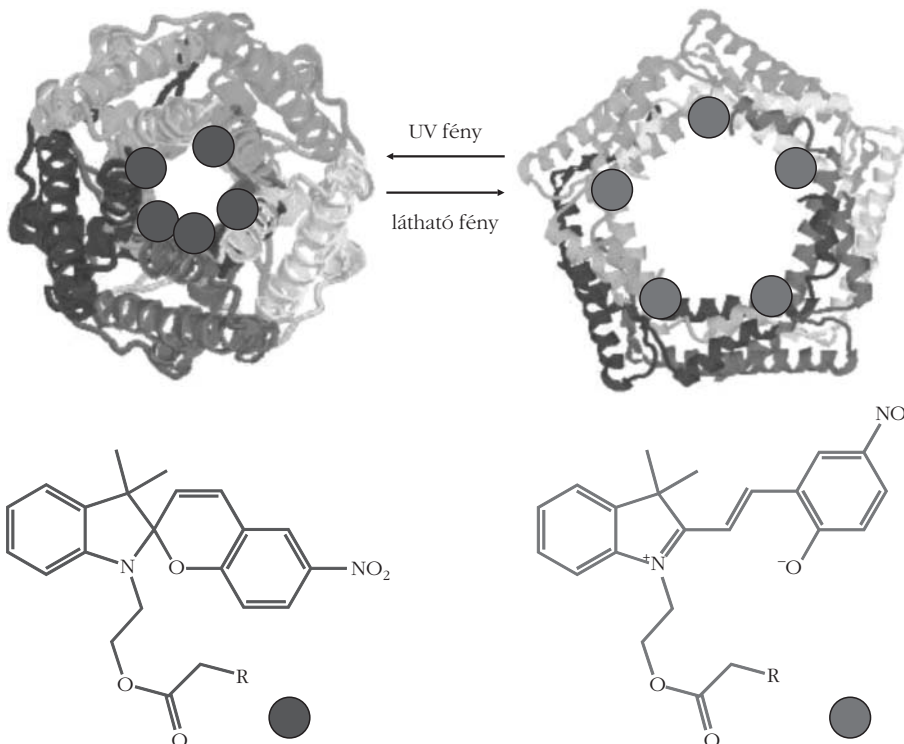
Látható, hogy az alap- és gerjesztett állapotok energiaprofiljainak kiemelt szerepe van a kapcsolási folyamatban: (i) Követelmény, hogy S_0 és S_1 keresztezzék egymást A és B közel merőleges elfordulása esetén.





2. ábra. 160 kbit tárolására alkalmas molekuláris áramkör (*Nature* 445 (2007) 414).

3. ábra. Molekuláris szelep alapelve (*Nature Nanotechnology* 1 (2006) 25).



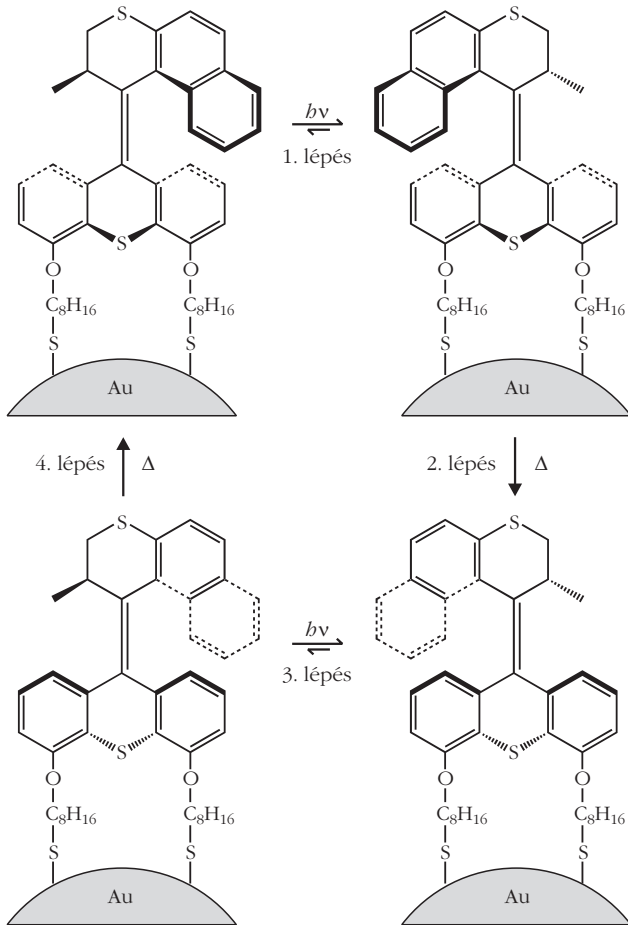
(ii) S_1 -nek a keresztezés pontjában minimuma kell, hogy legyen. A fordított irányú kapcsolás λ_2 hullámhosszú lézerrel valósítható meg ($\lambda_1 \neq \lambda_2$). A kereszteződés nagyon fontos szerepet tölt be, hiszen sugárzásmentes legerjesztődést, ezáltal pedig gyors (femtosekundumos) kapcsolást tesz lehetővé. Ennek megfelelően az elméleti vizsgálatok során ilyen keresztezési pontok (valójában multi-dimenziós felületek kereszteződése) keresése kiemelt fontosságú és nagy kihívást jelent.

A molekuláris kapcsolók fenti jellemzőik alapján kétállapotú tárolókként lehetőséget biztosítanak elemi bitek és ezáltal információ tárolására molekuláris szinten. Ilyen irányú elméleti elektronszerkezeti vizsgálatokat végzett *A. L. Sobolewski* a közelmúltban [9, 10, 11], illetve csoportunk is a Debreceni Egyetemen [8, 12], amelynek eredményeképpen számos kinolinszármarék kapcsoló tulajdonságára derült fény.

Green és munkatársai kimagasló kísérleti eredményeket értek el a molekuláris szintű információ-tárolás területén [13]. 2006-ban sikeresen előállítottak egy 160 kbit információ rögzítésére alkalmas eszközt, amelynek pásztázó elektronmikroszkópos képe a 2. ábrán látható. Kiderült, hogy a leghatékonyabb elrendezést az egymásra merőleges, nagyon sűrűn elhelyezett nanovezetékekből álló tömbök jelentik. Ezáltal kialakítható egy olyan molekuláris áramkör, amelynek minden egyes csomópontjában egy – elektromos árammal kapcsolható – molekula van elhelyezve (esetükben ez a bistabil [2]rotaxane rendszer volt). Szilícium, titán és platina nanovezetékeket használva 10^{11} bit/cm² sűrűséget sikerült előállítaniuk, amely a szerzők számításai szerint megegyezik a 2020-ra várható DRAM-ok bitsűrűségével.

Áramkörük ugyan nem volt teljesen hibamentes, azonban a használható csomópontokban sikerült többszöri beírást és kiolvasást megvalósítaniuk. Az elért sűrűség makroszkálára történő kiterjesztése jelentheti majd az elkövetkező évek egyik nagy kihívását.

A molekuláris szintű eszközök kutatásának egy másik jelentős és talán legismertebb képviselője *Ben L. Feringa*. A Gröningeni Egyetem professzorának vezetésével kimagasló eredmények születtek a molekuláris nanotechnológia, molekuláris elektronika és a kontrollált molekuláris dinamika területén. 1991-ben publikáltak elsőként olyan molekuláris kapcsolóról, amelyben a kiralitás fény segítségével változtatható. Később kiderült, hogy ez a rendszer szabályozott körülmények között



4. ábra. Molekuláris motor arany felületen (*Annu. Rev. Phys. Chem.* 60 (2009) 407).

képes kétirányú forgómozgás végzésére, valamint elemi információtárolásra is alkalmas.

Feringa és munkatársai elsőként állítottak elő fényvel vezérelhető molekuláris motorokat, majd pedig ezeket továbbfejlesztve mikrométeres tartományba eső objektumok szabályozható forgatását is megvalósították. A Philips céggel együttműködve jelentős fejlesztéseket végeztek a folyadékkristályos kijelzők és optoelektronikai eszközök területén, felhasználva azt a tényt, hogy optikai anyagok törésmutatója külső hatásra szintén változtatható. A folyadékkristályok orientációjának módosításával hangolható a törésmutató, ezáltal pedig az optikai jel alakja, ami az optikai adatfeldolgozás optimalizálását teszi lehetővé.

A BioMaDe csoport segítségével (ami egy olyan nanotechnológia vállalat, amely a tudományos alap-kutatás ipari innovációját segíti) egy olyan fehérjeláncból felépülő molekuláris szelepet szintetizáltak, amely elektromágneses sugárzás vagy pH-változás hatására működtethető. Mint azt a 3. ábra mutatja, a szelep nyitása látható fényvel, zárása pedig ultraibolya-sugárzással történik. A fehérjeláncba spiropirán kapcsoló molekulákat ágyaztak be (sötétebb és világosabb szürke korongok), amelyek UV-sugárzás hatására átalakulnak az elektromosan töltött formából (világos szürke) semleges hidrofób formába (sötét szürke). A hidrofobicitásban bekövetkező változás a

fehérjelánc bezárulását eredményezi. Látható fényvel a folyamat megfordítható, a szelep kinyílik.

A molekuláris szelepek kiemelt szerepet kapnak az élő szervezet transzportfolyamatainak szabályozásában. A sejtek falába építve őket külsőleg szabályozható a be-, illetve kiáramló anyag mennyisége, lehetőség nyitva ezáltal az orvostudomány számára a gyógyszerek felszívódásának irányításában.

A 4. ábra egy aranyfelülethez kapcsolt molekuláris motor egyszerűsített működési sémáját mutatja be.

Maga a motor lényegében egy alkil-tiol lábakkal arany nanorészecskéhez rögzített alkén vegyület. A kettős rögzítésnek köszönhetően az alkén molekula alsó állórésze fixen tartható, amíg a felső rotorrész a forgómozgást végzi. Az álló- és forgórészt egy kettős szénkötés kapcsolja össze.

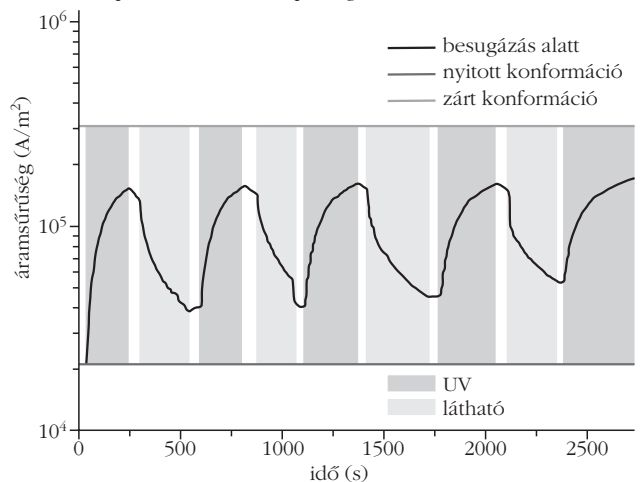
A forgási folyamat négy fő lépésből áll, két cisz-transz izomerizációból (1. és 3. lépés), illetve az őket követő termikusan gerjesztett konformációs változásokból (2. és 4. lépés). Ez utóbbiak fontos szerepet játszanak a rendszer visszafordulásának megakadályozásában. Az imént leírt folyamatot Feringa egy 2005-ös munkájában közölte először [14], amelyben NMR spektroszkópiai vizsgálatokkal sikerült bizonyítani, hogy a fenti rendszer több egymást követő teljes fordulat végzésére képes.

A molekuláris eszközök utolsó alkalmazása – amiről említést szeretnénk tenni – az elektromos vezetőképesség kapcsolhatósága. 2008-ban *Kronemeijer* és társai készítettek egy molekuláris áramkört, amelyben diáril-etén molekulák konformációjának kapcsolásával változtatni tudták a körben folyó áram sűrűségét (5. ábra). Ez az alkalmazási lehetőség alapvető fontosságú a molekuláris áramkörök, illetve a magasabb szintű eszközök fejlesztésében.

Összegzés

A tudomány és technika mára elérte azt a szintet, hogy számos, a hétköznapijainkban nélkülözhetetlené vált eszköz, mint például áramkörök, információtá-

5. ábra. Kapcsolható vezetőképesség (*Adv. Mater.* 20 (2008) 1467).



rolók stb. már a molekulák mérettartományában is megvalósultak. Ezen miniatürizálási folyamatnak kétségkívül jelentős szerepe lesz a jövőben, kiemelten az informatikában, ahol az adattárolási sűrűség csakis a mikrovilág felé haladva növelhető.

Irodalom

1. M. Born, R. Oppenheimer, *Ann. Phys.* 84 (1927) 457.
2. H. J. Werner et al.: *MOLPRO, a Package of ab initio Programs.* (<http://www.molpro.net>)
3. R. Ahlrichs, M. Bär, M. Häser, H. Horn, C. Kölmel, *Chem. Phys. Lett.* 162 (1989). 165
4. M. J. Frisch et al., *Gaussian Dev. Version, Revision H.01* Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2009.

5. H. D. Meyer, U. Manthe, L. S. Cederbaum, *Chem. Phys. Lett.* 165 (1990) 73.
6. L. S. Cederbaum, E. Gindensperger, I. Burghardt, *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 113003.
7. B. L. Feringa: *Molecular Switches.* Wiley-VCH, 2001.
8. A. Csehi, L. Illés, G. J. Halász, Á. Vibók, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 15 (2013) 18048.
9. A. L. Sobolewski, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 10 (2008) 1243.
10. L. Lapinski, M. J. Nowak, J. Nowacki, M. F. Rode, A. L. Sobolewski, *Chem. Phys. Chem.* 10 (2009) 2290.
11. M. F. Rode, A. L. Sobolewski, *J. Phys. Chem. A* 114 (2010) 11879.
12. A. Csehi, C. Woywod, G. J. Halász, Á. Vibók, *Cent. Eur. J. Phys.* 11 (2013) 1141.
13. J. E. Green et al., *Nature* 445 (2007) 414.
14. R. A. van Delden et al., *Nature* 437 (2005) 1337.

A KVANTUMMECHANIKA A KÍSÉRLETEZŐK KEZÉBEN: A 2012-ES FIZIKAI NOBEL-DÍJ

Benedict Mihály
Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszék

A kvantummechanika működése az 1980-as évek közepéig csak olyan körülmények között volt ellenőrizhető, amikor a vizsgált rendszer nagyszámú atomból, elektronból, mikrorészecskéből állt. A Planck-féle kvantumhipotézis a hőmérsékleti sugárzással kapcsolatban vagy az atomspektrumok diszkrét jellege egyaránt sokaságokon volt csak ellenőrizhető, és bár kevesek kételkedtek, hogy individuálisan is érvényes a szuperpozíció elve, a tényleges kísérletek hiányoztak. Sokaságon végzett mérés volt az először Jönsson által 1959-ben elvégzett kétréses kísérlet is elektronokkal, amelyet vizsgolt A. Tonomura az 1980-as évek második felében már olyan időfelbontásban végzett el, hogy az egyes elektronok becsapódása külön-külön is láthatóvá vált.

A 2012-ik évi fizikai Nobel-díjasok Serge Haroche francia és David Wineland az Egyesült Államok kutatója egyedi kvantumrendszereken végzett méréseikért és különösen azok célzott manipulációját lehetővé tevő áttörő kísérleteikért kapták a kitüntetést. A díjazottak által vezetett két csoport kísérletei között sok hasonlóság van, de azt is lehet mondani, hogy ugyanannak a

„Sohasem végzünk kísérleteket egyetlen atommal vagy molekulával. Gondolatkísérletekben néha föltesszük ugyan, hogy ez lehetséges, de mindig képtelen következményekhez jutunk.”

Erwin Schrödinger, 1952

jelenségkörnek a két különböző oldalával foglalkoztak. Egyszerűen fogalmazva: a francia laboratóriumban *dobozba zárt fotonok* állapotait vizsgálták és manipulálták a dobozon átküldött atomokkal, míg az amerikai kutatók éppen fordítva: *dobozba zárt atomok* kvantum viselkedését befolyásolták lézerek fotonjaival. Ebben az ismertetőben először a tavalyi Nobel-díjasok munkáinak a múlt század közepéig visszanyúló, nem kevésbé fontos előzményeit tárgyaljuk, majd rátérünk a francia kutatók munkájának bemutatására, amelyek elsősorban az elektromágneses mező kvantum tulajdonságaival foglalkoztak. Az amerikai csoport ezzel szemben atomok, illetve ionok belső és külső szabadsági fokainak összecsatolt manipulációjával szereztek meg az elismerést, erről szól a cikk befejező része [1].

A félklasszikus Rabi-oszcilláció

Nézzük tehát röviden az előzményeket. *Isidor Rabi* az 1930-as években dolgozta ki rezonanciás eljárását, amelyet ő „molekulanyaláb”-módszernek nevezett. A módszerrel valójában egy mágneses mezőn keresztüthaladó atommagok spinállapotai közötti átmeneti frekvenciát lehetett megmérni, és ezáltal a mag mágneses momentumát meghatározni. Minthogy a jelen cikk is Nobel-díjasokról szól, érdemes megjegyezni, hogy Rabi a Nobel-díjat 1944-ben kapta meg, és igazi nagyságát az is mutatja, hogy számos híres doktorandusza közül később hárman is elnyerték ezt a kitüntetést: *Norman Ramsey*, aki közvetlenül Rabi kísérleti

Jelen írás az ELFT DOFFI 2013 rendezvényén június 22-én elhangzott előadás alapján készült. Köszönöm Cserti Józsefnek, a DOFFI szervezőjének a meghívást. Az anyaghoz fölhasználtam az ELFT Csongrád Megyei Csoportja és az MTA Szegedi Bizottsága rendezésében a témáról 2012. november 30-án tartott előadásokat. Ezúton is szeretnék köszönetet mondani Bergou Jánosnak (Hunter College NY), Domokos Péternek (Wigner FKK), Czirják Attilának és Földi Péternek (SZTE) Szegeden megtartott előadásaikért. A munkát a TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt támogatta.



David Wineland és Serge Haroche Stockholmban 2012. december 7-én.

munkáját folytatta (róla még lesz szó az alábbiakban), *Martin Perl*, aki a tau leptont megtalálta és *Julian Schwinger*, aki egyebek közt elsőként számolta ki az elektron mágneses nyomatékának kicsiny kvantum-elektrodinamikai korrekcióját.

Az NMR, a mag-mágneses rezonancia módszer (*F. Bloch*, *E. Purcell*, Nobel-díj 1952) lényegében szintén Rabi eljárásán alapul, csak emitt egy sűrű anyagban például szilárd testben bekövetkező nívóeltolódást keresik a nagyon érzékeny rezonanciamódszerrel. Rabi, illetve Bloch és Purcell módszerét sikerült az orvosi képalkotásban is hasznosítani, ez az MRI (Magnetic Resonance Imaging) módszer a röntgenfölvételeknél jóval élesebb, kontrasztosabb képeket tud mutatni az emberi test belső állapotáról. A vizsgálat során egy erős mágneses mezőt keltő nagy, gyűrű alakú mágnesbe tolják be a páciens. A testben lévő atommagok különböző spinállapotai ebben a mezőben eltérő energiájúak, fölhasadnak. Ha a mágneses mezőnek térbeli gradiense is van, akkor a test különböző pontjain ez a fölhasadás különböző, s ennek mértéke függ ezen kívül a mag környezetétől is, tehát attól a szövetől, amelyben a mag található. Így a különböző környezetű atommagok kissé más frekvencián mutatnak abszorpciós rezonanciát, ha a spinnívók között az erős térre merőleges irányban rezgő, de annál jóval kisebb amplitúdójú gyöngé térrel átmenetet gerjesztünk. A rezonáns frekvencia értékét letapogatva, megfelelő érzékelők segítségével képet lehet produkálni. Az orvosi rutinban is használható eszköz megalkotásához persze még számos technikai és elvi részletkérdést kellett megoldani, ami első sorban *R. Damadian*, *P. Lauterbur* és *P. Mansfield* munkássága révén valósult meg. Közülük az utóbbi két kutató 2003-ban orvosi Nobel-díjat kapott, Damadian – sokak szerint igen méltatlanul – nem.

Nézzük most röviden a Rabi-módszer alapjául szolgáló kvantummechanikai modellt. Az egyes atomi

állapotokban való megtalálás valószínűségi amplitúdói az időfüggő Schrödinger-egyenlet megoldásaként kaphatók. Az atomra az időben oszcilláló $E(t) = E_0 \cos \omega t$ alakba írható, egyelőre klasszikusnak tekintett elektromos mező hat, ez a félklasszikus leírás. Az atommal való kölcsönhatás során elegendő azt a két stacionárius atomi állapotot egy alsót: $|\downarrow\rangle$ és egy felsőt: $|\uparrow\rangle$ figyelembe venni, amelyek között ez a tér átmenetet hozhat létre, azaz amelyek energiái közt az

$$\frac{\epsilon_{\uparrow} - \epsilon_{\downarrow}}{\hbar} = \omega_0$$

Bohr-frekvencia rezonáns vagy közel rezonáns a külső mezővel, tehát: $\omega \approx \omega_0$. Az atom eszerint – éppen úgy, mint a feles spin mágneses mezőben – kétnívósna tekinthető, amely nívók egy H_0 -val jelölt atomi Hamilton-operátor két stacionárius állapotát jelentik. A teljes

$$H = H_0 - DE_0 \cos \omega t \quad (1)$$

Hamilton-operátor második tagja a D dipólmomentumon keresztüli csatolást írja le a mezővel. A H -hoz tartozó Schrödinger-egyenlet megoldása megadja az elektromos mező hatására a

$$|\Psi(0)\rangle = a_0 |\downarrow\rangle + b_0 |\uparrow\rangle$$

kvantumállapotból a

$$|\Psi(t)\rangle = a(t) |\downarrow\rangle + b(t) |\uparrow\rangle \quad (2)$$

állapotba fejlődő rendszer $a(t)$, $b(t)$ amplitúdóinak időfüggését:

$$a(t) = a_0 \cos \frac{\Omega_r t}{2} + b_0 \sin \frac{\Omega_r t}{2}, \quad (3)$$

$$b(t) = b_0 \cos \frac{\Omega_r t}{2} + a_0 \sin \frac{\Omega_r t}{2}. \quad (4)$$

Ez a Rabi-megoldás¹ a legegyszerűbb esetben, ahol az

$$\Omega_r = \frac{dE_0}{\hbar} \quad (5)$$

mennyiséget klasszikus rezonáns Rabi-frekvenciának

¹ Ez a megoldás az úgynevezett kölcsönhatási képen és a nagyon jól teljesülő forgóhullámú közelítésben érvényes, lásd például az [1] vagy a [2] referenciákat.

nevezzük, amely a mező és az atom csatolásának erősségét jellemzi. Itt $d = \langle \downarrow | D | \uparrow \rangle$ az atomi D dipólmomentum-operátor átmeneti mátrixeleme a két stationárius állapot között. A $\theta(t) = \Omega_r t$ szöveget Bloch-szögnek szokás nevezni. A Rabi-frekvencia általában 5-6 nagyságrenddel kisebb, mint az átmenethez tartozó Bohr-frekvencia.

Legyen kezdetben az atom az alsó $|\downarrow\rangle$ állapotban, akkor az előzőek szerint

$$\begin{aligned} a_0 &= 1, & b_0 &= 0, \\ a(t) &= \cos \frac{\Omega_r t}{2}, & b(t) &= \sin \frac{\Omega_r t}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

azaz a felső szinten való tartózkodás valószínűsége

$$|b(t)|^2 = \left| \sin \frac{\Omega_r t}{2} \right|^2 = \frac{(1 - \cos \Omega_r t)}{2},$$

ami az Ω_r Rabi-frekvenciával periodikusan változik 0 és 1 között. Egy úgynevezett π -impulzussal, amelyre $\theta(t) = \Omega_r t = \pi$, a kezdetben alsó állapotban lévő atomot éppen a felső állapotba vihetjük. De ez fordítva is így van: a kezdetben felső állapotban lévő atom egy π -impulzussal éppen az alsó állapotba vihető. Viszont például $\theta = \pi/2$ esetén – amelyet $\pi/2$ -impulzusnak neveznek – a felső és az alsó nívó egyforma amplitúdójú szuperpozíciója valósul meg, akár a felső, akár az alsó állapotból indult az atom.

A fenti képletek azonban csak akkor helyesek ebben a formában, ha a közel monokromatikus külső mező (ω) és az átmenethez tartozó ω_0 Bohr-frekvencia nagy pontossággal megegyezik. Ha a gerjesztés frekvenciáját elhanyagoljuk a két nívó közti energiakülönbségnek megfelelő frekvenciától, azaz elrontjuk a rezonanciát, akkor az átmenet valószínűsége nagyon gyorsan csökken: ezen alapszik mindkét említett eljárás, a molekulanyaláb-módszer és az NMR is.² Tegyük még ehhez hozzá, hogy gyöngye külső tér esetén $\Omega_r t \ll 1$, $a(t) \leq 1$, $|b(t)|^2 \approx \Omega_r^2 t^2/4$, és ez a szokásos perturbációszámításból is megkapható eredmény, ami azonban nyilván nem érvényes erős térre vagy hosszú időkre. A fenti megoldásból az is látszik, hogy az elterjedt tévhit, amely szerint kétnívós rendszerben nem lehet inverziót létrehozni, általánosságban nem igaz.

Itt igen lényeges, hogy a környezet által okozott relaxációt és azon belül még az elektromágneses vákuum fluktuációiból eredő spontán emissziót is elhanyagoltuk, ami akkor jogos, ha a relaxációs időállandók – köztük a spontán emisszióé is – jóval hosszabbak a Rabi-frekvencia reciprokánál, és éppen ilyen körülmények között érvényesülhet a fenti egyenletekkel leírható koherens folyamat. Ez az egyszerű modell rendkívül fontos alkalmazások alapjául szolgál, mégis érdekes, hogy a hozzá kapcsolódó Nobel-díjak száma

² A Schrödinger-egyenlet megoldása ekkor is megoldható egyszerű függvényekkel, erre nézve lásd például [1, 2].

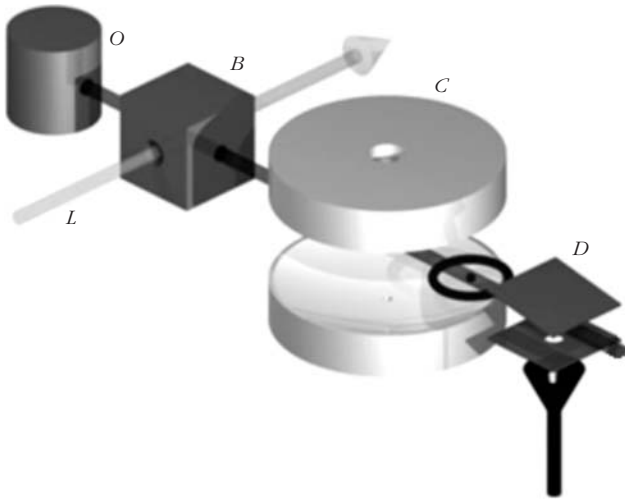
meglepően nagy. Megjegyezzük még, hogy a szokásos értelemben vett indukált emisszió és abszorpció a főtínél hosszabb időskálákon bekövetkező inkoherens folyamatok következményei.

A Rabi módszer alkalmazásai közül már említettük az NMR spektroszkópiát és az orvosi képalkotást. Ezek mellett a fizika szempontjából a módszer alapvető az *időstandard rögzítése* szempontjából is. Ez jelenleg a Cs-atom alapállapotában a hiperfinom fölhasadásból származó körülbelül $\omega_0/2\pi = 9,2$ GHz-es átmenetét rögzíti. Ennek tíz jegy pontossággal megadott értéke tulajdonképpen a másodperc definíciója. A mai atomórák ezen az átmeneten az inverziót egyetlen π -impulzus helyett két egymást időbeli szünettel követő $\pi/2$ impulzussal érik el, és ha a rezonancia pontos, akkor – amint azt először a már említett N. Ramsey (Nobel-díj 1989) megmutatta – az eredmény ugyanaz mint egyetlen π impulzusé, de a rezonancia $\omega = \omega_0$ helye jóval pontosabban letapogatható. Technikaig ez úgy működik, hogy a lehűtött Cs-atom felhőt [4] egy lézérimpulzussal fölfelé lökik körülbelül 1 m magasságra. A függőleges hajítás során a szökőkút atomjai a tetőpont közelében egyszer fölfelé, utána lefelé áthaladnak egy-egy $\pi/2$ impulzus erejéig az oszcilláló mágneses mezőn. Ha ezek együtt éppen invertálják az atomokat – amit ezután a jóval lassabb spontán emisszió maximumát észlelve lehet regisztrálni –, akkor a mágneses mezőt keltő oszcillátor pontosan a Cs-atom átmeneti frekvenciáján jár.³

Fotonok az üregben

Az Ecole Normale Supérieure és a Collège de France professzora S. Haroche és az általa vezetett csoport az 1980-as évek végétől kezdte el ⁸⁵Rb atomok és mikrohullámú fotonok kölcsönhatását vizsgálni, ahol a fotonok egy rendkívül nagy belső reflexióval rendelkező szupravezetőből készült üregrezonátor elektromágneses mezőjének kvantumelektrodinamikának szokás nevezni. A kísérletezők az atomokat egyenként küldték át a C rezonátoron (*1. ábra*), amelyet úgy méreteztek, hogy azt a rubídium egy alkalmas, alább tárgyalandó átmenetének frekvenciájával össze tudják hangolni. A gömbi tükrök által formált Fabry–Perot-jellegű üreg mérete néhány cm, és ennek egy 9 félhullámhosszból álló 51 GHz-es – keresztirányban Gauss-eloszlású – állóhulláma, módusa volt rezonáns az atomi átmenettel. Ennek révén sikerült kísérletileg is megvalósítaniuk az egyetlen atom és egyetlen mezőmódus *kvantum* kölcsönhatását. Az eredményt, azaz a gerjesztés valószínűségét az üregből kilépő atomok állapotának statisztikájából kapták. Egy megfelelő erősségű-

³ A Cs-szökőkút óra működését és animációját az alábbi linkeken nézhetjük meg:
<http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/primary-frequency-standards.cfm>
<http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/upload/fountain-mpg.mpg>



1. ábra. Haroche kísérleteinek sematikus rajza. Az O jelű kályhából érkeznek a Rb-atomok, amelyeket a B dobozban preparálnak a megfelelő belső állapotba, illetve itt állítják be az atomok sebességét is. A C jelzi a rezonátort, amelyben a kölcsönhatás létrejön, a C-be becsatolható mikrohullámú mező erőssége változtatható. A kölcsönhatási idő az atomok sebességével állítható be. A D detektor jelzi, hogy az üregből érkező atom az alsó vagy a felső állapotban található.

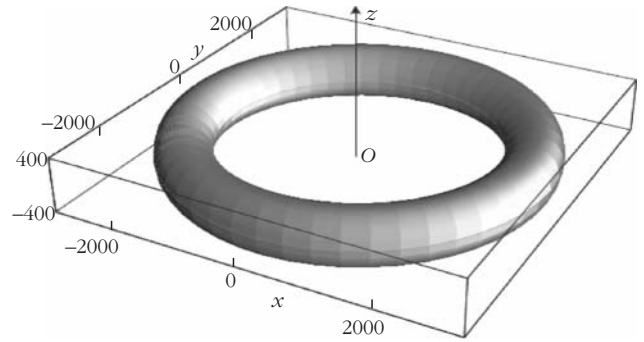
nek választott statikus elektromos mező a $|\uparrow\rangle$ állapotú atomot ionizálja míg a $|\downarrow\rangle$ állapotú atomot már nem, így a $|\uparrow\rangle$ állapotú atomok elektromos áramot jeleznek egy műszeren, míg a $|\downarrow\rangle$ állapotúak nem.

Ez az egyetlen atom plusz egyetlen módus rendszer az elméleti fizikusok kedves – mert egzaktul megoldható – modellje, ám sokáig reménytelennek látszott,⁴ hogy csak egyetlen atom tartózkodjék egy olyan üregben, ahol elegendő hosszú ideig „él” az adott módushoz tartozó foton ahhoz, hogy a kölcsönhatás létrejöhessen.

Ezt először az 1980-as évek közepén a München melletti Max Planck Kvantumoptikai Intézetben sikerült megvalósítani, de az ottani csoport vezetője, *Herbert Walther* sajnos nem érte meg a Nobel-díjat, 2006-ban elhunyt. A 2000-es években Haroche és munkatársai viszont olyan üreggel végezték a kísérleteket, amelynek Q jósági tényezője $3 \cdot 10^{10}$ -t is elérte, azaz a foton a sajátfrekvencia reciprokának Q -szorosáig, tehát tizedmásodperces nagyságrendig nem hagyta el az üreget. A másik komponens – az atom – esetükben egy úgynevezett Rydberg-típusú állapotba gerjesztett Rb-atom volt, amelynek külső elektronját sikerült az $\tilde{n} = 51$, $\ell = \tilde{n} - 1 = 50$, $m = 50$ kvantumszámokkal jellemzett, úgynevezett cirkuláris állapotba hozni.⁵ Az ilyen nagy kvantumszámok esetén az elektron a H-atom Bohr-féle modelljének elektronjára hasonlítva egy $\tilde{n}^2 a_0$ sugarú körvonal mentén tartózkodik nagy valószínűséggel, miközben az $\ell - \ell' = \pm 1$ kiválasztási szabály csak az egyetlen,

⁴ Idézet az [2] referenciából: “The interaction of a single atomic dipole with a monochromatic radiation field is an important theoretical problem in electrodynamics. It is an unrealistic problem in the sense that experiments are not done with single atoms or single mode fields.”

⁵ A főkvantumszám \tilde{n} jelölését a mező fotonszámát jelző n kvantumszámtól való megkülönböztetésül használjuk.



2. ábra. Egy cirkuláris Rydberg-állapot elektroneloszlása.

ugyanilyen jellegű $\tilde{n}' = \tilde{n} - 1 = 50$, $\ell' = \ell - 1 = 49$ nívóra történő átmenetet engedi meg. Az átmenethez viszont \tilde{n}^2 -tel arányos átmeneti elektromos dipólmomentum tartozik, amely az $\tilde{n} \approx 50$ miatt a szokásosnál 2500-szor erősebb csatolást hoz létre az üregebeli mezővel. A fenti úgynevezett cirkuláris Rydberg-állapot (2. ábra) elérése egy külön trükkös eljárás, aminek a részleteire itt nem térhetünk ki [1]. A kísérletekben az atomok egyenként, változtatható sebességgel repülnek át az üregen és hatnak kölcsön a mezővel. A két objektum ezalatt – bizonyos szempontból – úgy viselkedik, mint két csatolt inga, amelyek periodikusan cserélik az energiát egymás között, amiről tudjuk, hogy annak gyakorisága jóval kisebb, mint az ingák saját lengéseinek gyakorisága. Az atom és a mező esetén éppen ez a gyakoriság a Rabi-frekvencia.

Ha az üregebeli mező olyan gyöngye, hogy benne az átlagos fotonszám egységnyi nagyságrendű, akkor semmiképpen nem tekinthető klasszikusnak. Ekkor azt várjuk, hogy a mező diszkrét struktúrája, a fotonok léte lényegessé válik. Ez indította el *Edwin Jaynes* megfontolásait az 1960-as években, aki úgy vélte, nem biztos, hogy a mező leírásához valóban kell a kvantumelmélet – azaz a kvantumelektrodinamika –, lehetséges, hogy a fotoeffektus, amire a fotonhipotézis egyik fontos kísérleti bizonyítékaként tekintünk, megmagyarázható pusztán az atomi nívók diszkrét voltával, a mező kvantálása nélkül is. A spontán emisszióról pedig szintén megmutatták, hogy az az elektromágneses mező *klasszikus* fluktuációinak következményeként is magyarázható. Ez lenne az úgynevezett „neoklasszikus elektrodinamika”. Ennek nyomán vizsgálta Jaynes és *F. Cummings* híres modelljüket, amely a Rabi-probléma kvantum-elektrodinamikai változata, ahol a mező kvantumos jellegét is figyelembe veszik.

A megfelelő Hamilton-operátor eszerint:

$$H_{JC} = \hbar \omega \left(a^+ a + \frac{1}{2} \right) + \frac{\hbar \omega_0}{2} \sigma_z - i \hbar \frac{\Omega_0}{2} (a^+ \sigma_- - a \sigma_+). \quad (7)$$

Itt az első tag a mező módusát, mint harmonikus oszcillátort leíró energia szerepel, a második tag az atomi Hamilton-operátort modellezi, amelyben σ_z két saját-

értékének (± 1) megfelelően a két nívó között $\hbar \omega_0$ az energiakülönbség, végül a harmadik tag a csatolás a két szabadsági fok között, $a^+ \sigma_-$ kelt egy fotont és eközben az atomot legerjeszti, míg $a \sigma_+$ eltüntet egy fotont miközben az atom az alsó állapotból a gerjesztett állapotba kerül. Az Ω_0 állandó a csatolás erősségére jellemző, amit alább tárgyalunk. Megjegyezzük, hogy itt ismét használtuk a forgóhullámú közelítést, ami az $a^+ \sigma_+$ és $a \sigma_-$ típusú nemrezonáns tagok elhagyását jelenti, lásd [1, 2]. A modell kiváló tulajdonsága, mint jeleztük, hogy a klasszikus feladathoz hasonlóan szintén egzaktul megoldható, és ami lényeges, hogy attól eltérő eredményre vezet. Ekkor ugyanis az említett két rezgő kvantum objektum: az atom és a mező közti energiacsere frekvenciája csak diszkrét értékű lehet, ez a kvantum Rabi-frekvencia, amit alább röviden tárgyalunk. Amennyiben a kísérlettel mérni lehet a Rabi-frekvenciát, eldönthető, hogy a neoklasszikus vagy a kvantum-elektrodinamikai elmélet a helyes.

Diszkrét Rabi frekvenciák

Kezdetben legyen az atom – a második szakaszban tárgyalt félklasszikus esethez hasonlóan – most is a $|\downarrow\rangle$ és a $|\uparrow\rangle$ kvantumállapot valamilyen szuperpozíciójában, ám ezúttal (7)-nek megfelelően a mező módusát is kvantumosnak tekintjük, amelynek állapotait célszerűen a (7) első tagja sajátállapotainak, vagyis az úgynevezett $|n\rangle$ fotonszám-sajátállapotok ($n = 0, 1, \dots$) valamilyen szuperpozíciójával adjuk meg. Így az együttes állapot a kölcsönhatás előtt

$$|\Psi(0)\rangle = (a_0 |\downarrow\rangle + c b_0 |\uparrow\rangle) \sum_{n=0}^{\infty} c_n |n\rangle. \quad (8)$$

Amint azt először Jaynes és Cummings és velük egyidőben, tőlük függetlenül H. Paul a H_{JC} -hez tartozó Schrödinger-egyenlet megoldásával megmutatták,⁶ a két részből álló kvantumrendszer a köztük lévő kölcsönhatás következtében a

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) |\downarrow\rangle |n\rangle + b_n(t) |\uparrow\rangle \quad (9)$$

állapotba fejlődik [1, 2], ahol az egyes amplitúdók az alábbi módon adhatók meg:

$$a_{n+1}(t) = a_{n+1}(0) \cos \frac{\Omega_n t}{2} - b_n(0) \sin \frac{\Omega_n t}{2}, \quad (10)$$

$$b_n(t) = b_n(0) \cos \frac{\Omega_n t}{2} - a_{n+1}(0) \sin \frac{\Omega_n t}{2}. \quad (11)$$

Ezt (8)-cal összevetve láthatólag $a_n(0) = a_0 c_n$, $b_n(0) = b_0 c_n$, és kiderül továbbá, hogy

⁶ Paul munkája jóval kevésbé ismert, mert igen rövid és németül jelent meg: H. Paul: Induzierte Emission bei starker Einstrahlung. *Annalen der Physik* 466 (1963) Heft 7–8, 411.

$$\Omega_n = \Omega_0 \sqrt{n+1}, \quad (12)$$

ami kvantált Rabi-frekvenciákat jelent. Látható, hogy az eredmény hasonlít a korábban mutatott klasszikus megoldáshoz, de az ottani (5) Ω , helyére a diszkrét értékeken végigfutó $-\Omega_n$ lép. Az Ω_0 neve a vákuum Rabi-frekvencia, mert az $n = 0$ azt jelenti, hogy a térben nincs foton.

Ω_0 értékét a következőképpen lehet megkapni. Ha a mező módusában nincs egyetlen foton sem (vákuum) az elektromos térerősség akkor is jelen lehet, mert a térerősség operátorának várható értéke nulla ugyan, de szórása nem, vagyis fluktuációkat mutat. Ehhez a vákuumhoz tartozó \mathcal{E}_0 elektromos térerősséget úgy kapjuk meg, hogy a V térfogatú üregben lévő \mathcal{E}_0 -hoz tartozó elektromágneses mező energiáját egyenlővé tesszük a nullaponti energiával. Az ehhez az

$$\frac{\epsilon_0 \mathcal{E}_0^2 V}{2} = \frac{\hbar \omega}{2}$$

egyenletnek eleget tévő \mathcal{E}_0 -hoz tartozó

$$\Omega_0 := \frac{d\mathcal{E}_0}{\hbar} = \sqrt{\frac{d^2 \omega}{\epsilon_0 \hbar V}}$$

a vákuum Rabi-frekvencia.⁷

Az atom kezdeti állapotát az üregbe való érkezés előtt lehet beállítani egy erős, klasszikusnak tekinthető mezővel, amelynél az atomi állapot a klasszikus Rabi-megoldásnak megfelelően változik.

A kísérletek során több különböző kezdőállapotú atom+mező rendszert vizsgáltak. Az egyik fontos esetben egy úgynevezett *koberens állapotú*, tehát a klasszikusnak leginkább megfelelő mezőt csatoltak az atomok átküldése előtt az üregbe. Ebben az esetben a mező amplitúdóját (annak kvantum várható értékét) az $\alpha \mathcal{E}_0$ mennyiséggel adhatjuk meg, ahol α egy dimenziótlan komplex szám. Egy ilyen kvantumállapotot az jellemez, hogy abban az n fotonos állapot

$$c_n = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}}$$

amplitúdóval, tehát a

$$p_n = e^{-|\alpha|^2} \frac{|\alpha|^{2n}}{n!}$$

Poisson-eloszlásnak megfelelő valószínűséggel van jelen, vagyis a fotonszám nem határozott [4]. Az n fotonszám várható értéke viszont, ami az intenzitásra jellemző, természetes módon $\langle n \rangle = |\alpha|^2$ -nek adódik, azaz az intenzitás az amplitúdó abszolút érték négyzete. A kísérletekben éppen a kvantum jelleg megfigyelhető

⁷ Egy szigorúbb levezetés szerint \mathcal{E}_0 az elektromos térerősség operátorának az $n = 0$ állapotbeli szórása, bizonytalansága.

sége érdekében gyöngé mezőt használtak, a módusban az $\langle n \rangle$ átlagos fotonszám kevesebb volt 2-nél. A mező alapállapota a vákuum, ahol $n = 0$ az üregnek nagyon mély hőmérsékletre való hűtésével ($k_B T \ll \hbar \omega$) érhető el, sőt ezen túl még az alsó állapotban lévő atomokat is átküldenek az üregben, hogy azok gerjesztett állapotban kilépve vigyék ki a még ott lévő fotont. Ha a fotonszám átlaga ennél jóval nagyobb, akkor a becsatolt mező már klasszikus jelnek tekinthető és visszakapjuk a félklasszikus Rabi-képletet.

Haroche csoportja 1996-ban kimutatta, hogy az üregbe csatolt klasszikus mező amplitúdójának növelése során a Rabi-frekvencia csak diszkrét értékeket vesz föl: a fotonszám négyzetgyökével arányosan változik a (12) képletnek megfelelően. Ez a fotonok létezésének kísérleti bizonyítéka, egy olyan – a látható fényénél 6 nagyságrenddel kisebb – frekvencián, ahol fotoeffektusról szó sem lehet. Viszonylag gyöngé mező, $\langle n \rangle < 1$ esetén az egyes fotonállapotoknak megfelelő kvantum Rabi-frekvenciák még külön észlelhetők (3. ábra).

Atomok összefonása fotonokkal

Ugyanezzel a kísérleti elrendezéssel másfajta elvi fontosságú kísérleteket is el lehetett végezni. Egymást követően két atomot küldenek be az üregbe, amely kezdetben a $|0\rangle$ vákuumállapotban van. Az első atom a $|\uparrow\rangle_1$ felső állapotban érkezik és olyan sebességgel halad, hogy $\Omega_0 t_1 = \pi/2$ -nek megfelelő t_1 ideig tartózkodik benn. Így a (8) kezdeti állapotban $b_0 = 1$, és $c_0 = 1$, míg az összes többi együttható nulla. Ekkor a fenti (10) és (11) képletekből következően az üregben való áthaladás után a rendszer a

$$\frac{|\uparrow\rangle_1 |0\rangle - |\downarrow\rangle_1 |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

szuperpozícióba kerül, tehát a rendszer $1/\sqrt{2}$ amplitúdóval a kiinduló állapotban marad, míg ugyanekkora nagyságú, de negatív amplitúdóval az atom legerjesztődik, miközben egy fotont emittál a mezőbe, majd az atom elhagyja a kölcsönhatási régiót. Ezután küldik be a második atomot a $|\downarrow\rangle_2$ alsó állapotban és fele akkora sebességgel mint az előzőt. Így a most

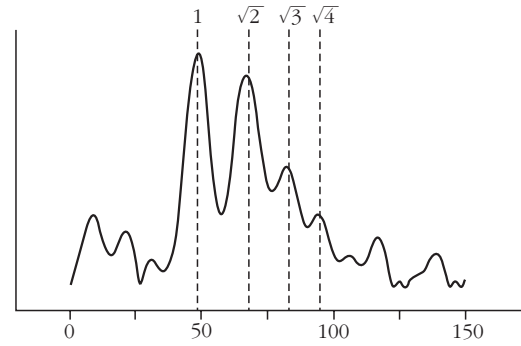
$$|\downarrow\rangle_2 \frac{|\uparrow\rangle_1 |0\rangle - |\downarrow\rangle_1 |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

állapotból induló rendszernek csak a

$$|\downarrow\rangle_2 \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

részén történik változás, de a kölcsönhatás ideje kétszerese az előzőnek, $\Omega_0 t_2 = \pi$. Az eredmény ismét a (10) és (11) képletekből következően

$$|\Psi\rangle |0\rangle = \frac{|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2}{\sqrt{2}} |0\rangle, \quad (13)$$



3. ábra. A mérés során az üregbe felső állapotban érkező atomok ugyancsak a felső állapotban való tartózkodási valószínűségét mérik az üregből való kilépés után. Ennek Fourier-transzformáltját mutatja az ábra a kHz-ben mért frekvencia függvényében egy $\langle n \rangle = |\alpha|^2 = 0,85$ átlagos fotonszámú, a C üregbe csatolt koherens állapotú mező esetén. Az egyezés kiváló a

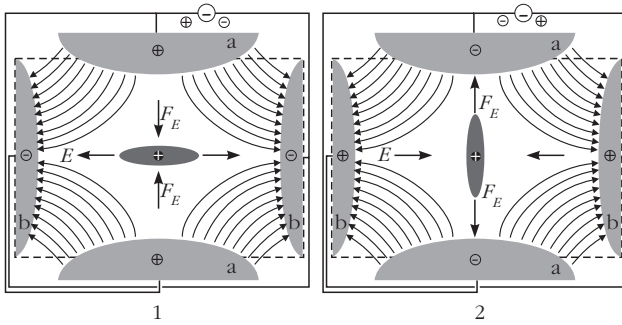
$$P_n = \sum_n e^{-|\alpha|^2} \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} \cos^2\left(\frac{\Omega_0 t}{2} \sqrt{n+1}\right)$$

elméleti valószínűség spektrumával.

tehát a két atom egy úgynevezett Bell-állapotba kerül, amely összefonódott, miközben a mező visszakerül a vákuumállapotba. Az érdekesség itt az, hogy az üreg egymáshoz képest bizonyos késéssel átküldött két atom úgy kerül összefonódott állapotba, hogy közben nem is találkoznak egymással, sem az állapot kialakítása során, sem azután. Az összefonódást az üregben való áthaladáskor a mező hozza létre, katalizálja a folyamatot, a mező állapota viszont végeredményben nem változik. A $|\Psi\rangle$ állapotban a kirepülő atomokon végzett korrelációs tulajdonságokat mérésekkel ellenőrizték, és ezzel a rendszerrel is kimutatták a Bell-egyenlőtlenség sérülését, azaz a kvantummechanikával rivális lokális rejtett paraméteres elmélet lehetetlenségét.

A mező Schrödinger-macska állapotai

Ugyancsak ebből az időből való Haroche csoportjának az a fontos eredménye, amelyben az üregbeli mező módusát két – makroszkopikusan különböző – Glauber-féle koherens kvantumállapot szuperpozíciójába hozták. Ezek első elméleti vizsgálata Janszky József nevéhez fűződik [5]. A mező eme úgynevezett Schrödinger-macska állapotainak létrehozására vonatkozó kísérletekről lásd [6]. Másfajta macskaállapotokról alább, Wineland kísérletei kapcsán szövegezzük bővebben. A párizsi csoport elmúlt évtizedben végzett kísérletei során elsősorban a mező tulajdonságainak vizsgálatára koncentrált, amely továbbra is a kvantum furcsaságok gazdag tárháza. Érdekes még megjegyezni, hogy S. Haroche az 1997-ben Nobel-díjat nyert C. Cohen-Tannoudji tanítványa, aki viszont a szintén Nobel-díjas A. Kastler (1966) neveltje. Haroche elméletileg is nagyszerűen fölkészült fizikus. Alapvető kísérletei előtt munkatársaival, köztük elsősorban J. M. Raimonddal együtt, többször publikált olyan kiváló és kristálytisztán megírt átfogó cikkeket, amelyekből szinte azonnal tanítani lehet az elméleti



4. ábra. A csapda metszete az x - y síkban. A potenciál matematikai alakja a tengely közelében jó közelítéssel az

$$U(\mathbf{r}, t) = \frac{U_0}{2} \left(1 + \frac{x^2 - y^2}{R^2} \right) \cos \omega_{rf} t$$

időben változó nyeregpotenciál, ahol R az elektróda és a tengely távolsága. Az ábrán az ebből származó elektromos erővonalak láthatók a rezgés két fázisában. Az ω_{rf}^{-1} -hez képest hosszú időre átlagolva ez egy stabil helyzetet eredményez. Szemléletesen: miközben a töltés a nyereg lejtős irányába indul, a lejtős irány emelkedővé, az emelkedő lejtőssé változik és visszatéríti a töltést az eredeti helyére, ami periodikusan ismétlődik.

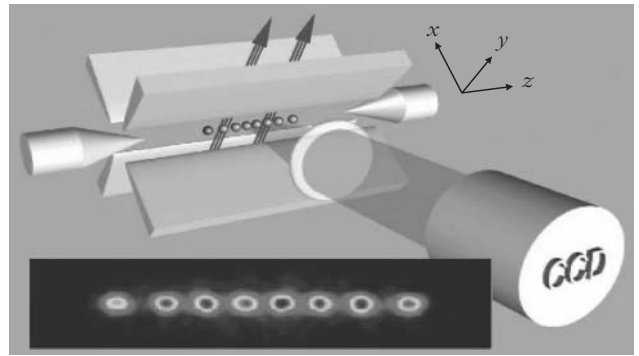
háttérrel és a rendszerint nagy nehézséget jelentő kísérleti megvalósítás lehetőségeit is.⁸ Haroche csoportjának mérései nagy ötletességgel fedték le a kvantummechanika számos alapvető kérdését, és amit csak meg lehetett valósítani az általuk létrehozott berendezéssel, azt el is végezték [1, 6]. Ezekről a főntiekben csak nagy vonalakban tudunk ízelítőt adni.

Ionok csapdában

A másik 2012-ik évi Nobel-díjas, David Wineland az USA National Institute of Standards and Technology (NIST) Boulder (Colorado) kutatójaként nyerte el a kitüntetést. Ő egyébként N. Ramsey doktorandusza volt, és kísérleteit egy úgynevezett Paul-féle csapdában megállított ionokkal végezte. Minthogy ponszerű töltés *stabil* egyensúlyát statikus elektromos terekkel nem lehet elérni (Earnshaw-tétel⁹), a csapdában egy időben körülbelül $\omega_{rf} = 10$ -100 MHz frekvenciával rezgő, a 4. ábrán látható kvadrupólus jellegű mezőt keltenek, amely egy nyeregponttal bíró potenciál. ω_{rf}^{-1} -hez képest hosszú időt tekintve egy stabil átlagos helyzet jön létre. Ezt szemléletesen úgy érthetjük meg, hogy miközben a töltés a nyereg lejtős irányába indul, a lejtős irány emelkedővé, az emelkedő lejtőssé változik és így visszatéríti a töltést az eredeti helyére, és ez periodikusan ismétlődik. *Wolfgang Paul* (No-

⁸ Engedtesse meg az elfogult elméleti fizikusnak a megjegyzés, hogy fizikai Nobel-díjat olyan kísérletezők is kaptak már, akik eredetileg egyáltalán nem tudták, hogy mit mérnek, s azt mások – akik Nobel-díj nélkül maradtak – már korábban megíjsolták, illetve megmagyarázták.

⁹ Az egyensúly $\mathbf{F} = -\nabla U|_P = 0$ feltétele valamely P pontban nyilván teljesülhet, de a stabilitáshoz az kellene, hogy a próbatöltésre ható potenciálnak P -ben szigorú minimuma is legyen. Ehhez $\nabla^2 U|_P > 0$ lenne szükséges, ám ez ellentmond a sztatikus tér potenciáljára (a próbatöltés nélkül) érvényes $\nabla^2 U|_P = 0$ Laplace-egyenletnek.



5. ábra. Egy ionsapda sematikus ábrája. A nyilak a manipuláló lézernyalábokat jelzik. A benne lévő 8 iont a CCD-kamerán át látni is lehet, ezt mutatja az ábra alsó része. Az ionok egy lineáris lánc-ként rezegnek a z tengely mentén, a módus típusától függően a csapdafrekvenciánál körülbelül egy nagyságrenddel lassabban.

bel-díj 1989) eme ötletét jól szemlélteti az a mechanikai analógia, amelynél egy valódi nyereg egy függőleges tengely körül forog, s így a golyó nem gurul le a nyereg középpontjából.¹⁰

Az ionsapdák kidolgozásának egy másik, szintén Nobel-díjas (1989) úttörőjével *Hans Dehmelt*tel együtt Wineland 1975-ben javaslatot tett arra, hogyan lehetne a csapdában az ionokat megállítani, azaz lehűteni, majd 1978-ban ezt ténylegesen el tudta végezni. Több atom mozgásának és megállásának, azaz egy atomi szintű fázisátalakulás, a fagyás első megfigyelése, sőt láthatóvá tétele szintén a főntebb említett H. Walther nevéhez köthető. Egy erős rezonáns átmenetet pumpálva ugyanis egyetlen ion is olyan sok fotont képes szórni, hogy azt egy mikroszkópon keresztül látni lehet, ezt mutatja az 5. ábra alsó része. Érdekes még azt is megemlíteni, hogy az 1980-as évek közepén a Dehmelt-féle csoport egyetlen elektront is hosszú ideig – több hónapig – csapdában tudott tartani, és azon fontos kísérleteket tudott végezni, például az elektron Schwinger által kiszámolt anomális mágneses momentumának mérését. A laboratóriumba reggelente bejövő fizikusok az egyetlen csapdázott elektront, amely hónapokig keringett változatlanul, mindennap mint régi ismerőst üdvözölhették, de ez már egy másik érdekes történet.

Wineland kísérleteiben elsősorban ${}^9\text{Be}^+$ -ionokat használt, amelynek szintén egy alkáli fém, a Li elektronszerkezetéhez hasonló nívói vannak, és ezáltal optikailag is jól manipulálható. Egy másik ion, amit hasonló célra szoktak használni a ${}^{40}\text{Ca}^+$, ami még annyival is egyszerűbb a Be^+ -nál, hogy nincs magspinje (mint ismert a ${}^{40}\text{Ca}$ magja kétszer mágikus mag), ezért az optikai spektruma is viszonylag egyszerű.

Az ionokat lézeres hűtéssel lényegében akár nyugalomban is lehet tartani. Ha nem ez a helyzet, akkor az egyensúlyból kitérített ion vagy az ionok egy a csapda térerőssége által meghatározott ω_m körfrekvenciájú rezgő mozgást végeznek, ami rendszerint

¹⁰ http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/electricity_and_magnetism/electrodynamics/paul_trap.html A link a valódi csapda működését is mutatja.

egy nagyságrenddel lassabb az ionokat csapdában tartó időfüggő mező ω_{rf} rádiófrekvenciás változásánál. Az ω_m -nek megfelelő rezgés az úgynevezett makromozgás, míg erre szuperponálódik a mindig jelenlévő ω_{rf} frekvenciájú kis amplitúdójú rezgés, a mikromozgás. Ez utóbbi biztosítja a csapdázást.

Az ionok makromozgása külső lézertérrel csatolható azok belső elektronállapotaihoz, némileg hasonlóan ahhoz, ahogyan Haroche csoportjának kísérleteiben az üreg oszcillációi és az atomok állapotai közötti csatolás megvalósult. A Wineland-féle kísérleteknél tehát szintén két oszcilláló kvantumobjektumról van szó, az egyik ismét egy gerjeszhető „kétívós atom”, de a másik most nem a mező egy módusa, hanem magának az ionnak a harmonikus rezgése a csapdán belül.

Első pillanatra nem látszik, hogyan lehet ezt a két szabadsági fokot összecsatolni. A kulcs itt is a lézer, amellyel az ionokat megvilágítva az akár rezonáns, akár nemrezonáns módon csatolni tudja a mozgást a belső gerjesztéssel. Az atom által „érzett” lézertér ugyanis függ attól, hogy hol tartózkodik a csapdában. A lézertér sikhullámnak véve a kölcsönhatási energia Hamilton-operátora most a következő:

$$H_i = \hbar \frac{\Omega_i}{2} \exp(-i\omega_i t + i k_i Z \cos\vartheta) \sigma_{\pm} + h.c. \quad (14)$$

Itt Ω_i a lézertér és az atomi dipól kölcsönhatásakor föllépő $\Omega_i = dE_i/\hbar$ Rabi-frekvencia, ω_i az atomot megvilágító külső lézer körfrekvenciája, $k_i = \omega_i/c$ a megfelelő hullámszám, ϑ pedig a csapda tengelye (a z tengely), amely mentén az ionok mozognak és a külső lézertér \mathbf{k}_i hullámszámvektora által bezárt szög. A lényeges pont itt az, hogy a z tengely mentén mozgó ion helyzetét figyelembe vevő $k_i Z \cos\vartheta$ tagban a koordinátát nem klasszikusan, hanem a koordináta Z operátorával adjuk meg. Írjuk a Z -t az oszcillátor kvantummechanikájából jól ismert

$$Z = z_0 (a + a^\dagger) \quad (15)$$

alakba, ahol a és a^\dagger a léptető operátorok és

$$z_0 = \sqrt{\frac{2\hbar}{m\omega_m}}$$

az m tömegű ionnak az ω_m körfrekvenciával jellemzett rezgésénél a koordináta szórása az alapállapotban, azaz lényegében az ismert Gauss-alakú koordináta-hullámfüggvény szélessége. Vezessük be az

$$\eta_0 := k_i z_0 = \frac{2\pi z_0}{\lambda_i}$$

definícióval az úgynevezett Lamb–Dicke-paramétert, amely az ion alapállapot kiterjedésének és a lézer hullámhosszának aránya szorozva 2π -vel. Ez általában kis szám, mivel az ion mérete a csapdában jóval kisebb, mint a rendszerint a látható tartományban mű-

ködő lézer hullámhossza. Így az exponenciálisban a kis $\eta = \eta_0 \cos\vartheta$ paraméter miatt a helyfüggő rész sorbafejthető $\exp(i\eta[a+a^\dagger]) \approx 1 + i\eta(a+a^\dagger)$, és csak az energiaörző tagokat megtartva kapjuk, hogy

$$H_i = i\hbar \frac{\Omega_i}{2} (a^\dagger \sigma_- - a \sigma_+). \quad (16)$$

A H_i -ben szereplő két tag itt azt a két lehetséges folyamatot jelenti, hogy (i) az atom belső állapota legerjesztődik és ugyanakkor egy ennek megfelelő kvantummal nő a rezgési energiája, illetve fordítva, (ii) a rezgésből egy adag energia eltűnhet, ha közben ugyanennyivel nő az atom belső energiája, azaz a felső gerjesztett állapotba kerül. Ha még hozzáveszünk a két különálló részrendszerhez (a mechanikailag ω_m frekvenciával oszcilláló ion + a két belső ívó) tartozó szokásos Hamilton-operátorokat, akkor ismét a (7) Jaynes–Cummings-féle probléma áll előttünk. A belső atomi állapotok és a rezgési állapot (16)-tal megadott kölcsönhatásából itt is periodikus energiacsere következik (mint a csatolt íngák esetén), és a kvantumjelleg miatt ismét diszkrét lebegési frekvenciák megjelenését várjuk. A Wineland-féle csoport egyik fontos kísérlete éppen ezek kimutatása volt. Érdekes módon ennek publikálása a mező diszkrét voltát jelző kvantum Rabi-frekvenciák mérését bejelentő Haroche-féle cikkel együtt a *Physical Review Letters* azonos számában jelent meg 1996-ban – a két csoport megegyezett az azonos publikálási időpontban. Winelandék egyébként ugyanebben a közleményben kísérletileg bemutatták egyetlen ion mozgásának mint oszcillátornak diszkrét számállapotait, koherens állapotait és az úgynevezett préselt állapotok létezését is. Kimérték ezen állapotoknak egymással való kapcsolatát, azaz a megfelelő kvantum ki-fejtési együtthatókat, amplitúdókat is.

Mozgási Schrödinger-macska állapotok

Mint már említettük a párizsi csoport egyik legszebb kísérlete volt a mező Schrödinger-macska jellegű állapotainak létrehozása. A mindennapi szemlélet számára viszont valószínűleg még elképesztőbb a boulderi csoport azon kísérlete, ahol az ion mechanikai mozgásában sikerült Schrödinger-macska állapotokat létrehozni. Az eredeti Schrödinger-gondolat szerint, ha a kvantummechanikát a makroszkopikus világra is érvényesnek gondoljuk, akkor egy macska és egy radioaktív mag együttes állapotaként elképzelhető a következő két állapot szuperpozíciója. Az egyik állapotban a radioaktív mag még nem bomlott el, és a macska él, a másikban pedig az elbomló magból induló bomlás-termék egy olyan berendezést hoz működésbe, amelyik elpusztítja a macskát. Az ennek megfelelő kvantumállapot alakja:

$$\frac{|\text{macska él}\rangle |\uparrow\rangle + |\text{macska elpusztult}\rangle |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Ha ilyet nem is, de egy olyan kvantumállapotot sikerült létrehozni, ahol egy ion egyszerre van két különböző makroszkopikus helyen, és ez azon múlik, hogy az ion kitérése a nyugalmi helyzetéből függ attól, hogy melyik belső állapotában van: az alsóban vagy a felsőben. Ha pedig a belső állapot a kettő szuperpozíciója, akkor ennek megfelelően az ion térbeli elmozdítása is két helyzet szuperpozícióját eredményezi. Ez alatt azt kell érteni, hogy az ion két olyan térbeli állapot lineáris kombinációjában van, amelyek a lokalizáltságnál egy nagyságrenddel nagyobb távolságra vannak egymástól. Eszerint egy alibi nem lehet megdönthetetlen bizonyíték egy kvantumrendszer, például egy atom esetén, mert az egyszerre két helyen is tartózkodhat. A két helyzet a fönti macskás állapothoz hasonlóan két különböző belső állapothoz is van csatolva. A kísérlethez használt ${}^9\text{Be}^+$ -ion két releváns belső állapota $|\downarrow\rangle$ és $|\uparrow\rangle$ az ion két hosszú életű hiperfinom alnívója volt, egymástól $\omega_0/2\pi = 1,25$ GHz frekvenciának megfelelő energiával. A csatolást a vibrációs állapot és a belső állapot között szintén lézerpulzusokkal lehetett elérni. A kísérlet során az atomok a harmonikus potenciált biztosító csapdában körülbelül 7 nm-es méretre voltak lokalizálva, míg az atomi hullámcsomag két része egymástól 83 nm távolságban volt lokálisan szeparálva.

A kvantumszámítógép és a kvantumóra felé

A későbbiekben a boulderi csoport a rezgési állapotokat kihasználva $N = 6$ ionnal hozott létre

$$\frac{|\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 \dots |\downarrow\rangle_N + e^{i\phi} |\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 \dots |\uparrow\rangle_N}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

formulával megadható igencsak törekeny kvantumállapotokat is, amelyek a legjobban hasonlítanak az elpusztult és élő Schrödinger-macska (17) szuperpozíciójához [7]. Itt jegyezzük meg, hogy az $N = 3$ esetet az azt először diszkutáló szerzők, *D. Greenberger*, *M. Horne* és *A. Zeilinger* nevének kezdőbetűi alapján GHZ-állapotnak is szokás nevezni.

Az ilyen típusú állapotok generálásának és manipulálásának lehetősége vezethet el a kvantum információfeldolgozás és azon belül a kvantumszámítógép egyik lehetséges megvalósításához. Ebben az esetben a kvantumszámítógép elemi objektuma, a qubit éppen az ion két állapota lenne. Az eszköz működéséhez arra volna szükség, hogy az N atom 2^N -féle kollektív állapotának tetszőleges szuperpozícióját minél nagyobb N -nel lehessen létrehozni, és a szuperpozíció elemeinek egymáshoz viszonyított fázisának – a fönti állapotban a ϕ -nek – stabilnak kellene maradnia. Látható, hogy ehhez valójában azon jóval szigorúbb feltételnek kell teljesülnie, hogy mind az N alkotórész egymáshoz viszonyított fázisa állandó maradjon. Ellenkező esetben a fönti típusú állapotok stabilan nem létezhetnek, az összefonó-

dás, vagyis a kvantuminformatikai előnyöket biztosító erőforrás megszűnik, ami dekoherenciát jelent [8], és ez annál erősebben jelentkezik, minél nagyobb az ionok száma. A tényleges implementálásnak ez a fő akadálya.

Egy kvantumszámítógéphez a stabilitás biztosításán túl az is kell, hogy az egyes qubiteket reprezentáló fizikai objektumok állapotait egyedenként lehessen változtatni, azaz címezni. A csapdázott ionok esetén ez elérhető, ha a szükséges állapotváltozást előidézni szándékolt és egyetlen ionra fókuszált lézernyaláb nyaka kisebb, mint az ionok közti legkisebb távolság. Ez a mai technológiával elérhető, mert például a 5. ábrán látható ionlánc esetén ez a távolság 10 μm nagyságrendű, ami jóval nagyobb, mint a manipulálásra használt lézerek – általában a látható vagy az UV-tartományba eső – hullámhossza. Ezért is lehet az ionokat egy mikroszkópon át külön-külön látni. További lényeges szempont a qubitekből álló kvantumos regiszterek kezelésénél, hogy a sok qubites állapotokat, mint alkalmas mérőberendezés sajátállapotait mérni is lehessen. A számos kvantuminformatikai könyv közül, amelyekből ezen kérdések matematikai, illetve elméleti részletei tanulmányozhatók, ajánljuk az érdeklőknek *Diósi Lajos* munkáját [9].

A kvantumos információfeldolgozás számos javasolt fizikai megvalósítása közül az ioncsapdás módszer igen előnyös, mert elvileg az ionokat hosszú ideig stabilan meg lehet tartani a csapdában, és a Wineland-csoport által javasolt érdekes trükkök révén [1] a számuk növelésére vonatkozóan sincs elvi akadály.

A Wineland-féle kísérletektől más típusú gyakorlati fölhasználás is várható, mert kollégáival Boulderben, az NIST munkatársaival az időstandard javításán is dolgoznak. A csapdázás és a kvantumtechnológia révén ugyanis egy atomfelhő azonos atomjai helyett már csupán egyetlen nyugvó atom vagy ion átmenetéhez lehet majd rögzíteni az időstandardot, ami a sok atom esetén jelentkező nem teljesen homogén frekvenciaeloszlást kiküszöböli. Így a jelenlegi atomórák helyett már készült egyetlen csapdázott ${}^{199}\text{Hg}^+$ -ion optikai átmenetét használó eszköz, illetve újabban az ${}^{27}\text{Al}^+$ -ion ${}^1\text{S}_0 \leftrightarrow {}^3\text{P}_0$ körülbelül 1,121 PHz-es átmenetén operáló óra, amely nagyon kevés érzékeny külső hatásokra, és a rendkívül éles vonal természetes vonalszélessége mindössze 8 mHz. Ebben a berendezésben a ${}^{27}\text{Al}^+$ óra-ion mellett egy úgynevezett logikai-ion egy ${}^{25}\text{Mg}^+$ is rezeg, a rezgés és a belső állapotok kölcsönhatása nyomán a logikai-ionra átkerülő gerjesztésből olvassák ki az órafrekvenciát [10]. Az ilyen optikai átmeneteken működő órák frekvenciája 5 nagyságrenddel nagyobb a Cs-óra frekvenciájánál, és az eddig elért stabilitásuk mintegy százszor jobb amazokénál. Amint ezen berendezések viszonylag egyszerűbb laboratóriumi körülmények közötti működtetése lehetővé válik, az időstandard is minden bizonnyal egy ilyen eszközön fog alapulni, nem kis mértékben Wineland kutatóinak is köszönhetően.

Irodalom

1. Mindkét részterület átfogó és jól érthető ismertetése olvasható S. Haroche, J. M. Raimond: *Exploring the quantum*. Oxford University Press (2006) című könyvében.
2. L. Allen, J. Eberly: *Optical resonance and two-level atoms*. J. Wiley (1975) NY.
3. Domokos P.: Semleges atomok lézeres hűtése és csapdázása. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 193.
4. A kvantum-elektrodinamikában, illetve a kvantumoptikában a koherens állapotok vizsgálata Roy Glauber nevéhez fűződik, aki 2005-ben kapta meg a Nobel-díjat. Lásd erről Varró S., Dombi P.: Optikusok elismerése: A 2005. évi fizikai Nobel-díj. *Természet Világa* 137/4 (2006) 560.
5. J. Janszky, A. V. Vinogradov, *Phys. Rev. Lett.* 64 (1990) 2771.
6. A részleteket illetően lásd az 1. monográfiában, illetve magyar nyelven Domokos Péter: *Kvantum-elektrodinamika üregrezonátorban*. Kvantumelektronika Tavaszi Iskola kiadványa, Pécs, 1999, <http://optics.szfyi.kfki.hu/~domokos/irasok/pecs99.pdf>
7. M. G. Benedict, A. Czirják, Cs. Benedek: Wigner function description of atomic Schrödinger cats. *Acta Phys. Slov.* 47 (1997) 259.
8. M. G. Benedict, A. Czirják: Wigner functions, squeezing properties, and slow decoherence of atomic Schrödinger cats. *Phys. Rev. A* 60 (1999) 4034; P. Földi, A. Czirják, M. G. Benedict: Rapid and slow decoherence in conjunction with dissipation in a system of two-level atoms. *Phys. Rev. A* 63 (2001) 33807.
9. L. Diósi: A short course in quantum information theory. *Lecture notes in Physics, Vol. 827*, 2-nd ed. 2011, Springer Berlin
10. C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, T. Rosenband: Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al⁺ Optical Clocks. *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 070802.

A FIZIKA TANÍTÁSA

MODELLSZÁMÍTÁSOK AZ ENERGIA OKTATÁSÁHOZ

Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet
Király Béla – Nyugat-magyarországi Egyetem

A régebbi szakmódszertani szakirodalom szerint szigorú követelmény, hogy a diákok elé kerülő feladatok a lehető legvilágosabb, legérthetőbb, legegyszerűbb megfogalmazásban jelenjenek meg, az adatok teljes körű megadásával és fölösleges adatok közlésének elkerülésével. *A valós élet problémái azonban nem ilyenek*, és ha csak ilyenekkel foglalkozunk az oktatás során, akkor nem tudjuk modellezni azokat a helyzeteket, amelyekbe tanítványaink ténylegesen kerülnek az iskola falain kívül. A mindennapokban felmerülő problémák általában kezdetben hiányosak, nem jól strukturáltak, nem kellően explicitek, az adatok köre nem teljes, és számos irreleváns, a végleges megoldásban majd szükségtelennek bizonyuló információ is adott. Az oktatás során az lenne teendőnk, hogy a gyerekeket tanítsuk meg az ilyen feladatok, problémák megfogalmazására is.

A problémamegoldás minden korosztály esetében fontos része a természettudományos ismeretszerzésnek. Menete minden korosztály esetében hasonló, csupán az egyes fázisok mélysége, részletessége változó. Olyan problémákkal célszerű foglalkozni, amelyek aktuálisak, vagy kapcsolatban vannak a tanulók életével.

Az alkalmazásképes tudás szerepe egyre jobban felértékelődik napjainkban, társadalmi elvárás az iskolával szemben. Elvárás, hogy a közoktatásból kikerülő diákok tudásukat új helyzetekben is képesek legyenek alkalmazni, tudjanak változatos témájú problémákat megoldani. Ezért az iskolával szemben támasztott követelmény az, hogy olyan életszerű problémákat tárjon a diákok elé, amelyek fontosak a társadalomban való eligazodás szempontjából, ne egyszerű rutinjelölések alkalmazását kérje számon.

A probléma felismerésének kérdése több szempontból is fontos a természettudományos tanulmányok során. Nagy a jelentősége azért, mert alakítja a tanulók motivációs bázisát, segíti a megértést, nagyban hozzájárul a bonyolult helyzetek elemzésének megértéséhez, fontos a megfelelő *döntések előkészítése* és meghozatala szempontjából. Ha megmutatjuk, hogy a tanult ismeretek alkalmasak arra, hogy segítségükkel valóságos vagy valósághoz közeli, szimulált problémákat megoldjunk, vagy a megoldások következményeit elemezzük, akkor a tudás presztízse jelentősen megnövekedhet. Ha a tudás elismertsége növekszik, *a gyerekek törekedni fognak annak megszerzésére*.

Az, hogy milyen a tanulók viszonya a természettudományos tudáshoz, illetve e tantárgyakhoz, nagyon fontos tényező a tanulás eredményessége szempontjából. Ha a gyerekek az iskolai tanulmányaik során, a tananyag elsajátítása közben problémákat fogalmaznak meg, és megoldási utakat találnak, annak egyik alapvető eredménye az lesz, hogy az adott ismeretkört megértik.

Az oktatás során alkalmazott problémák sokfélék lehetnek. Egyéni, vagy csoportos vizsgálódásra alkalmas, például

- a nyílt végű kérdésekre való széleskörű válaszkérés,
- a különböző felmérések készítését kívánó feladatok,
- a napilapokban és az interneten megjelent természettudományos témájú újságcikkek elemzése és értékelése.

Feladat a cikkek természettudományos tartalmának elemzése. Fontos annak vizsgálata, helyesen jelen-

nek-e meg a természettudományos ismeretek a médiákban, avagy előfordul, hogy torz világgépet tükröz némelyik írás. Nem csak kifejezetten ismeretterjesztő cikkekre gondolunk, hanem olyanokra is, amelyek bármilyen természettudományos problémához kapcsolódnak esetleg más, például társadalmi, politikai szempontból.

Ma már feladatunk az is, hogy megértsük a diákokkal, hogy a napilapokban megjelent cikkek sokszor szubjektívek és időnként politikailag is motiváltak. Ha valami nyomtatásban megjelenik, attól nem biztos, hogy minden tekintetben igaznak is tekinthető. Ezért a vizsgálatokat kiterjeszthetjük arra is, hogy az újságíró mennyire volt objektív, állítását számításokkal alátámasztotta-e, illetve milyen dolgokat nagytított fel vagy hallgatott el.

Jelen írásunkban közölt feladataink érdekessége az, hogy a számításokhoz szükséges adatokat különböző nyilvános adatbázisokból, illetve az internetről lehet venni. Tehát a *való életből és valós adatokkal végzett modellszámításokat* fogunk bemutatni, illetve még további feladatokat javasolni. Tesszük ezt azért, hogy a tanulók lássák, miként lehet egyszerű matematikai eszközök segítségével utána számolni a különböző híradásokban, tervezetekben számszerűen megjelenő állításoknak, és ne „dőljenek be” megalapozatlan, a tényeket mellőző kijelentéseknek.

Ha megnézzük a különböző „környezetvédelmi” csoportokat, akkor azt látjuk, hogy elsősorban a vágyaikat, nem pedig a tényeket közlik, és gondosan ügyelnek arra, hogy csak kinyilatkoztatásokat adjanak közre és ne részletes (főleg ne gazdasági megtérülési) számításokat, amelyeket bárki ellenőrizhetne.

Iskolás tudásnak tekinthetjük például, hogy a gyerekek ismerjen különböző fontos képleteket, mértékegységeket, összefüggéseket. Ez a tudás szükséges, de nem elégséges feltétele a problémamegoldásnak. Ahhoz nagyobb rálátás, elvonatkoztatás, a problémák összefüggéseinek elemzése, komplex gondolkodásmód is szükséges. Lényegében itt kapcsolódik az iskola az élethez, ekkor lesz a tantárgyi tudásból hétköznapi életben is használható tudás.

Ez a tudatos állampolgárrá nevelés szerves részét képezi. És ez a *fizikai, és a kémiai feladatmegoldás tanításának egyik fontos célja*.

Az energia olyan terület, amely mindenkit érint, ha másként nem, akkor a környezetterhelésen vagy a közüzemi számláin keresztül.

A következőkben nézzünk néhány olyan problémát, amelyek alkalmazhatók az energia előállításával kapcsolatos anyagrészek feldolgozásakor.

Az első modellszámítás a bioetanol előállításával kapcsolatos.

Egy személyautó Magyarországon átlagosan körülbelül 15 000 km-t tesz meg évente. 2011 végén a személygépkocsi-állomány 2 968 000 darab volt. Ezek 85%-a benzínüzemű. Mekkora földterületre lenne szükség átlagos termésbozom mellett, ha elhatárolnánk, hogy az összes benzínüzemű személygépkocsit

kukoricából előállított bioetanolal szeretnénk üzemeltetni? Ez a termőföldünk hány százalékát tenné ki?

Mik lennének ennek a programnak a buktatói? A szükséges adatokat keresse meg az interneten!

Magyarország területe 93 027,44 km², amelynek 48%-a szántóföld, ami 44 653,17 km² = 4 465 317 ha (hektár). 1 ha = 100 × 100 m = 10 000 m² = 0,01 km², a mezőgazdaságban még sok esetben ezt az egységet használják. A termésátlag egy jó évben 8 tonna/ha kukoricára a statisztikai adatok szerint. Ha mind a 48%-nyi termőföldön kukoricát termelnék az 8 t/ha × 4 465 317 ha ≈ 35,7 millió tonna.

Számoljunk úgy, hogy 1 liter bioetanol előállításához körülbelül 3 kg kukorica szükséges (ennél kevesebb szükséges, ez csak rossz minőségű kukoricára igaz), akkor a 35,7 millió tonna kukoricából 35,7/3 ≈ 12 millió m³ bioetanol állítható elő.

2 968 000 · 0,85 = 2 522 800 személyautó benzínüzemű. Az összes megtett km = 2 522 800 · 15 000 = 37,842 · 10⁹ km. Egy jól beállított autó 100 km-en 7 liter benzint fogyaszt, tehát a benzinszükséglet 265 · 10⁷ liter, 2,65 milliárd liter, ami 2,65 millió m³.

Vegyük a bioetanol fűtőértékét azonosnak a benzinnel, tehát akkor 2,65 millió m³ az ország szükséglete. Egy jó évben ennek többszörösét lehet előállítani: 11,9/2,65 = 4,49, közel 4 és félszeresét.

De ez azt jelenti, hogy a termőterület 0,22-ad részét, 22%-át erre kell fordítani. Több, mint egy ötödét! Az ország teljes területének közel 10%-át, ami körülbelül két megye teljes területe. Kérdés, hogy akkor mit eszünk?! 2012 például rossz év volt, az ország kukoricából még behozatalra is szorult.

A rend kedvéért becslésünk során vegyük figyelembe azt is, hogy 1 liter bioetanolhoz 0,5 liter benzint szoktak keverni, tehát csak a teljes üzemanyag-szükséglet 2/3-ad részét termeljük meg. De ez is a termőterület 14,5%-a.

A második modellszámítás a nukleáris energia felhasználásával kapcsolatos.

A paksi atomerőműben 4 reaktor működik. Reaktoronként a hőteljesítmény 1485 MW, a villamos teljesítmény 500 MW.

a. Becsüljük meg 1 reaktor üzemanyag-töltetét, ha tudjuk, hogy az üzemanyag körülbelül 4,2%-ban tartalmaz jól hasadó ²³⁵U-izotópot, és az izotóp koncentrációja (az egész töltetre nézve) évente átlagosan 1,14%-kal csökken! Tegyük fel, hogy a felszabaduló energia nagyrészt az ²³⁵U maghasadásából ered, ahol egy-egy hasadás alkalmával 32 pJ energia szabadul fel. (Évente átlagosan 330 napot üzemel egy-egy reaktor.) Mekkora a tömege és a térfogata?

b. Mekkora lenne a paksi erőművel azonos hőteljesítményű hőerőmű évi üzemanyag-szükséglete, ha az 24,5 MJ/kg fűtőértékű szenet használna? Mekkora lenne a tömege és a térfogata?

c. Becsüljük meg a szén-erőmű által évenként kibocsátott gáz térfogatát normál állapotban! Milyen vastagon borítaná be ez a szén-dioxid gáz Magyarországi területét, amely 93 027,44 km²?

Megoldás:

a. Határozzuk meg egy reaktor aktív zónájában naponként elhasadt uránmagok számát:

$$N_U = \frac{8,64 \cdot 10^4 \text{ s} \cdot 1,485 \cdot 10^9 \text{ W}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}} = 4 \cdot 10^{24}$$

A naponként elhasadt urán össztömege pedig:

$$m_U = \frac{4 \cdot 10^{24}}{6 \cdot 10^{23}} \cdot 0,235 \text{ kg} = 1,57 \text{ kg}$$

Évi 330 üzemnappal számolva, az ^{235}U elhasadt tömege évente: közel 517 kg. Az ehhez szükséges teljes üzemanyag tömege pedig:

$$M_{\text{töltet}} = \frac{517 \text{ kg}}{1,14 \cdot 10^{-2}} \approx 45,35 \text{ t}$$

A 4 blokkra összesen 181,4 tonna.

Térfogata: az urán sűrűsége meglehetősen nagy $19,1 \text{ g/cm}^3$, vagy $19\,100 \text{ kg/m}^3$, vagy $19,1 \text{ tonna/m}^3$. $V = m/\rho \approx 2,375 \text{ m}^3$ egy reaktor esetében, azaz 4 reaktorra $9,5 \text{ m}^3$.

Összehasonlításképp számoljuk ki egy kicsi szoba térfogatát. Magassága legyen 3 m, alapja $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. $V = 4 \times 4 \times 3 = 48 \text{ m}^3$, amelyben 5 évre elegendő töltet halmozható fel. A Paksi Atomerőműben 2 évre elegendő üzemanyagot tárolnak.

Az üzemanyag szállítási térfogata, és a kiégett, nagy aktivitású fűtőanyag térfogata is körülbelül ennyi. Ennél valamivel nagyobb, mivel nem fémuránt, hanem uránoxidot használnak. De annyi mindenképpen elmondható, hogy viszonylag nem nagy térfogatokról van szó más – például a szénnel működő – erőművekhez képest ezért a szállítási költség aránylag kevés. Természetesen a szállításnál és a tárolásnál komoly nehezítő tényező, hogy sugárveszélyes anyagról van szó.

Érdeemes arról is szót ejteni, hogy radioaktív hulladékok nemcsak az atomreaktorokban keletkeznek, hanem a radioaktív izotópok mezőgazdasági, ipari és orvosi alkalmazása során is. Például az izotópdiagnosztikai vizsgálatokhoz, a sugárkezelésekhez alkalmazott radioaktív preparátumok és azok tárolóedényei (kesztyűk stb.) is radioaktív hulladékok, igaz, ezek kis és közepes aktivitásúak, és az itt alkalmazott izotópok rövid felezési idejűek. Azonban ezen hulladékoknak nagyobb a térfogata. Ezek használata teljesen elfogadott a lakosság részéről. Természetesen ezek nagyon fontos alkalmazások, csak azért írtuk le, hogy jelezzük, a nukleáris technika elemeit máshol is alkalmazzák és ott is keletkezik hulladék.

b. A szükséges szén tömege 4 reaktorblokkra számolva:

$$m_{\text{szén}} = \frac{5,132 \cdot 10^{14} \text{ J} \cdot 330}{24,5 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 69,125 \cdot 10^8 \text{ kg} \\ \approx 6,9 \cdot 10^6 \text{ t}$$

Térfogata: a szén sűrűsége $1\text{--}0,85 \text{ tonna/m}^3$, tehát térfogata körülbelül $6,9$ millió m^3 lenne.

Gondolatban terítsük szét egy focipályára. A pálya mérete legyen $100 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 5000 \text{ m}^2$. $6\,900\,000/5000 = 1380 \text{ m} = 1,38 \text{ km}$ magas lenne. Magasabb, mint a Kékes!

Például a Mátrai Erőmű átlagos éves lignitfelhasználása $8,5$ millió tonna 700 MW -os teljesítmény eléréséhez. (A lignit fűtőértéke a becslésünkben használtnál lényegesen kisebb, átlagosan 7300 kJ/kg .)

c. Ha feltesszük, hogy a teljes szénmennyiség tökéletesen elég, akkor a szénatomokból szén-dioxid molekulák lesznek, ezek száma megegyezik a szénatomok számával. Ekkor a keletkező gáz anyagmennyisége:

$$n = \frac{6,91 \cdot 10^9 \text{ kg}}{1,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 5,76 \cdot 10^{11} \text{ mol}$$

Normál állapotban a szén-dioxid gáz térfogata:

$$V_N = 5,76 \cdot 10^{11} \text{ mol} \cdot 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \\ = 1,29 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$$

Az ország teljes területét bedefő normál állapotú gázréteg pedig:

$$l = \frac{1,29 \cdot 10^{10} \text{ m}^3}{9,302744 \cdot 10^{10} \text{ m}^2} \approx 13,9 \text{ cm}$$

vastag lenne.

Ez a gázmennyiség természetesen nem „teríti” be az országot a kiszámolt vastagságban, hanem eloszlik a légkörben, egy része elkerül az óceánokhoz, amelyben valamennyi feloldódik, másik részét a növények felhasználják fotoszintézisük során. A többlet-terhelés a környezetben számottevő.

Az sem mellékes azonban, hogy a szén elégetése során egyéb környezeti terheléssel is számolni kell, mint pernye, füst stb. Ezt legjobban Kínában lehet tapasztalni, ahol az erőteljes iparosítás következtében nagyon sok szénét égetnek el. Emlékezzünk a pekingi olimpiára, amikor a játékok idejére több nagyüzemet le kellett állítani, mivel elviselhetetlen volt a levegőszennyezés.

További javasolt feladatok

1. Egy mezőgazdasági társaság 500 ha (5 km^2) földterülettel rendelkezik, amelyen csak kukoricát termeszt. Elhatározzák, hogy ennek megműveléséhez traktoraik üzemanyagaként csak saját maguk által termesztett repceből előállított biodízeltszert használnak fel. Készítsen modellszámítást, hogy közelítőleg mennyi földet kellene még bérelniük, hogy elég kukoricát tudjanak termeszteni!

2. Egy család elhatározza, hogy holnaptól fogva környezettudatosan él, ezért villamosenergia-fogyasz-

tásuk egy részét a háztetőre telepített 20 m² napelemmel kívánják megoldani. Milyen egységekre lesz szüksége a családnak, mennyibe kerül a beruházás (ehhez interneten talál árakat), mennyi idő alatt fog megtérülni, milyen problémákkal kell szembesülniük az üzemeltetés során?

3. Képzeli el, Magyarország népszavazással dönti el, hogy a tervezett 2000 MW erőmű-kapacitás helyett más módon állítunk elő villamos energiát. A szavazáson a szélenergia győz, amelynek erőműveit az autópályák mellé telepítene. (Szándékosan alakítjuk így a feladatot, hogy még meghökkenőbb legyen az eredmény.) 1000 m-enként hány km-en keresztül kellene egy 2 MW-os (maximális teljesítményű) szél erőművet felállítani? Mennyi acélra és betonra lenne ehhez szükség? Ez a Dunai Vasmű és egy cementgyár éves kapacitásának hány százalékát fedné le? Milyen további beruházásokra lenne szükség, milyen problémák lépnének fel?

4. A hidrogént egyesek a jövő üzemanyagának tekintik, de arról kevés szó esik, hogy miből, hogyan és milyen energiabefektetéssel állítunk elő hidrogént. Tételezzük fel, hogy vízből elektromos energia felhasználásával. Magyarországon egy személyautó évente átlagosan 15 000 km-t tesz meg. 2011 végén a személygépkocsi-állomány 2 968 000 darab volt. Ezek 85%-a benzinüzemű. Készítsen modellszámítást arra, hogy ha a személygépkocsikat atomerőműben termelt elektromos energia segítségével előállított hidrogénnel töltenék fel, hány paksi atomerőmű blokk kellene ahhoz, hogy fedezzük ezt az energiát? A fűtőérték, vagyis a benzin energiátartalma valamennyi üzemanyagfajta esetében nagyjából ugyanannyi, körülbelül 12 kWh/kg (43 megajoule). A robbanómotoros autók hatásfoka 35% körül van és az átlagfogyasztása 7 liter/100 km (5,2 kg/100 km).

5. Egy család havonta 5 m³ 60 °C-os meleg vizet használ fel. Mekkora lesz a számla, ha a vízhálózatból érkező 15 °C-os vizet földgázzal vagy elektromos árammal melegítik fel? A hatásfokokról ne feledkezzen meg!

A fenti feladatokat oktatási környezetben kipróbáltuk, méghozzá környezettanszakra járó hallgatók esetében. A hallgatók választhattak a feladatok közül, a kiválasztottakat otthon oldhatták meg és a megoldásokat a vizsgán, annak részeként kellett bemutatni. Elmondható, hogy a hallgatóknak tetszett ez a fajta, hozzáférhető adatokra és tényekre alapozott feladatmegoldás. Ugyanis sok esetben vagyunk annak tanúi, hogy – különösen az energetikai kérdésekben – különböző szervezetek mindenféle számolás nélkül, elsősorban érzelmi alapon tesznek kijelentéseket.

Modellszámításainkkal nem az volt acél, hogy az azokból kapott eredmények pontosak legyenek, hiszen a felhasznált adatok számtalan forrásból, főleg az internetről származnak, hanem, hogy ne legyenek elvi tévedések, nagyságrendi eltérések. A diákok vegyék észre, azért kerül körülbelül háromszorosába, ha otthon a vizet gáz helyett elektromos árammal melegítjük, mert az erőművekben a hatásfok 30–40%-os, hogy hatalmas területeket kellene kukoricával bevetünk, ha benzinről bioetanolra térnénk át stb. A gondolkodásmód és a metodika elsajátítása volt a cél.

Irodalom

- Herman Edit, Kádár József, Martinás Katalin, Bezegh András: A kukorica alapú bioetanol magyarországi előállításának exergiaelemzése. *Fizikai Szemle* 53 (2013) 125–129.
- Király Márton, Radnóti Katalin: Az energiáról és az energiatermelésről, I–II–III. rész. *A Fizika Tanítása* 20 (2012) 2. szám 8–18., 3. szám 3–12., 4. szám 3–14., MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged.
- Molnár Gyöngyvér: *Tudástranszfer és komplex problémamegoldás*. Műszaki Kiadó, Budapest, 2006.

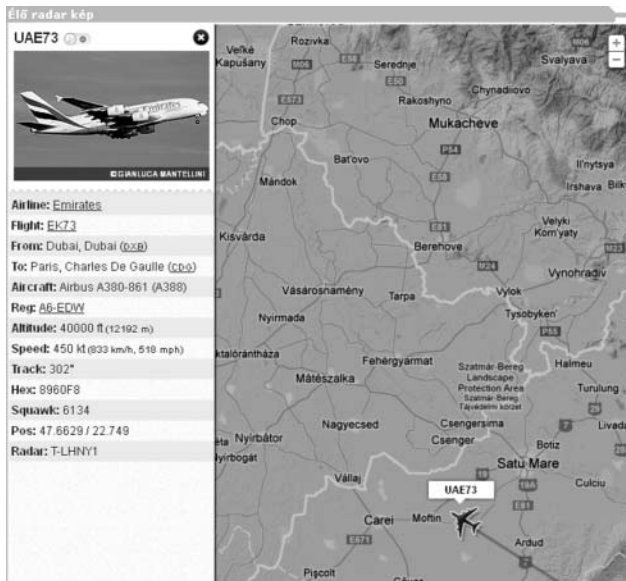
REPÜLŐGÉPEK SEBESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA KÜLÖNBÖZŐ MÓDSZEREKKEL

Stonawski Tamás
Báthori István Református Gimnázium
és Kollégium, Nagyecséd

A repülő mozgásának pályái a kondenzcsík miatt sokáig látszanak a földről a tiszta égbolton. A repülőgép pályája gyakorta egyenes, a légitársaság gazdaságossági szempontok alapján választja ki gépei útvonalait. A földi irányítás figyelmeztetheti, illetve javaslatot tehet a pilótának bizonyos pályamódosításokra, ha a körülmények azt kívánják. A légiirányítók a repülőket radar segítségével nyomon követik a monitoron, így nagyobb eséllyel akadályozhatják meg az esetleges légi katasztrófákat. Ma már lehetőség van arra, hogy a civilek is figyelemmel kísérhessék a repülő mozgását élő radarfelvétel, az interneten [1]. A radarkép segítségével azonosíthatjuk is a repülőgépeket a számuk alapján

(hasonlóan az autók rendszámához) (1. ábra), és az adataikat is lekérhetjük, például mekkora a sebessége, repülési magassága, mi a repülőgép típusa, milyenek a méretei, mi az úti célja, indulási helye... stb.

2012. december 13-án derült ég volt Nagyecséd felett, így a repülőgépek azonosítása után szabad szemmel is nyomon tudtuk követni a monitoron kiválasztott gépeket. A Nagykároly felett elvonuló repülőgépeket szabad szemmel már Nagyecsédre is megfigyelhettük (Nagykároly–Nagyecséd távolság 23 km). A mérés során egy Dubaiból induló és Párizsba tartó airbust szemeltünk ki (UAE73 azonosítási számmal). A számítógépen az élő radart videóra vettük egy speciális prog-



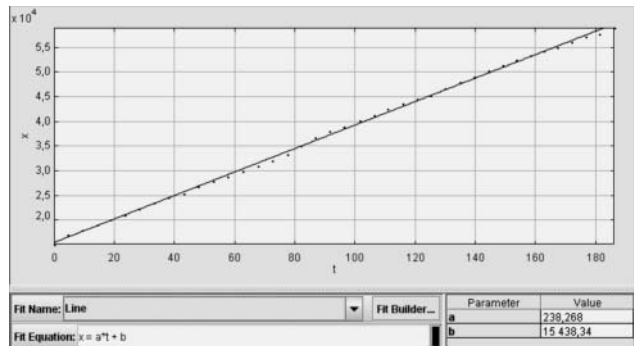
1. ábra. Az élő radarképről lekérhetjük a repülőgép műszaki és repülési adatait, és figyelemmel kísérhetjük a gép mozgását is.

ram [2] segítségével, közben kézi kamerával a repülőgép valóságos mozgását is rögzítettük, emellett a kijelzőn folyamatosan leolvastuk a repülőgép interneten közzétett pillanatnyi sebességértékeit, így három különböző módszerrel határozhattuk meg annak sebességét.

A radarkép elemzése videóanalízissel

A videóanalízishez a Tracker ingyenes letölthető szoftvert használtuk [3]. Az analízishez szükséges kalibrációhoz a térképen szereplő két város légvonalbeli távolságára volt szükségünk, amit a <http://www.tavolsag.info> oldalról kerestünk ki. Az élő radarkép frissítése igen gyors volt (1-2 s), így az analízist elég volt 60 képkockánként lefuttatni, hogy a repülőgépek mozgása folyamatosan legyen a vizsgált képeken. Az x koordinátatengelyt a repülőgépek mozgásának egyenesében vettük fel, a haladási irányt megegyezően. A radarképen mozgó kiszemelt repülőgépeken 3 perces mozgásának $x-t$ grafikonján ábrázolt pontokhoz illesztett egyenes meredeksége a repülő sebességének a nagyságát adta (2. ábra). Ez az érték $238 \text{ m/s} \approx 857 \text{ km/h}$ -nak adódott. Az élő radaron leolvasott érték 833 km/h volt, azaz igen jól megközelítette a mért értéket (3% az eltérés).

3. ábra. A fényképezőgéppel készített felvételen jól kivehető a repülőgép alakja, ami a gép paramétereinek kalibrálásához volt fontos tényező.



2. ábra. Az élő-radar felvételének videóanalíziséből kapott $x(m)-t(s)$ grafikon. A grafikon pontjaira illesztett egyenes meredeksége a repülő sebességét adja.

Kézi kamerával készített film elemzése videóanalízissel

A kézi kamerás felvételt sajnos állvány nélkül készítettük, így az elemzéskor a kamera „reszketésével” is számolnunk kellett.

A repülőgép típusa alapján kikerestük annak hosszát [4], ami a megtett út kalibrálásához volt fontos, hiszen a repülőgép valódi hosszából így az analízis során a valóságos útértékeket rendelhattük hozzá az időhöz.

A felvételt (3. ábra) egy Panasonic DMC-FZ30 Lumix típusú fényképezőgéppel készítettük, amelyen 12-szeres optikai és négyszeres digitális zoom beállítást alkalmaztunk.

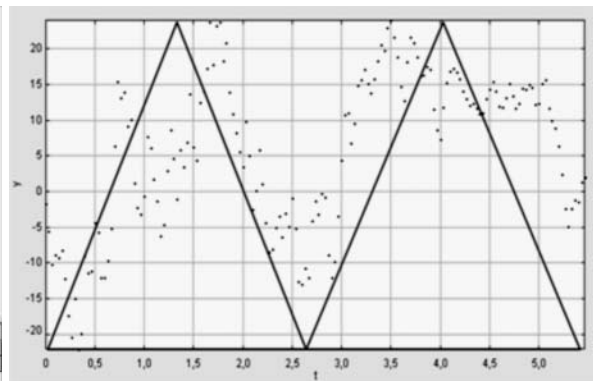
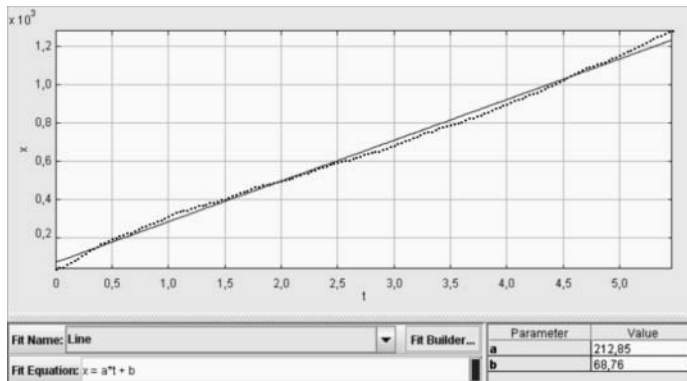
A felvételt akkor készítettük, amikor éppen feletünk járt a repülő, hogy az esetleges perspektivikus torzításokat kiküszöböljük. A felvételt szintén videóanalízisnek vetettük alá, az x tengelyt az egyenes vonalban mozgó repülő haladási irányában vettük fel.

Az $x-t$ grafikon pontjaira illesztett egyenes meredeksége a repülőgép sebességének nagyságát adta: $213 \text{ m/s} \approx 767 \text{ km/h}$.

A grafikon pontjait elemezve észrevehető egy periodikus sebességingadozás, ami a kamerát tartó kéz reszketésével magyarázható. A remegés időbeli változását az $y-t$ grafikonról tudtuk leolvasni (4. ábra). A remegés miatt a repülőgép képe ± 20 méterrel mozdult el az x tengely nyomvonaláról. Ha az elmozdulás időbeli lefolyását egyenletesnek tekintjük, az $y-t$ grafikon pontjaihoz rendelt fűrészvonal alapján leolvasható a sebesség „szórása”: $30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$. Azaz a repülőgép sebessége ezzel együtt: $767 \pm 108 \text{ km/h}$.

Következtetések

A méréseket diákszakkörön végeztük el. A diákok 10%-a utazott már repülővel, de a repülőgép utazási magasságát és sebességét a mérés előtt rosszul becsülték meg. A repülőgép sebességét átlagosan $300-400 \text{ km/h}$ -ra, a repülés magasságát $4-5000$ méterre becsülték, ami közelítőleg a valóságos értékek fele. A mérés legizgalmasabb része a repülő azonosítása volt, hiszen



4. ábra. A bal oldali $x(m)-t(s)$ grafikonon a pontsorhoz illesztett egyenes meredekségéből a repülő sebességét lehet leolvasni, de jól kivehető a periodikus „sebességingadozás” is. A jobb oldali $y(m)-t(s)$ grafikon az egyenes pályáról való letérést mutatja, ami a kamera remegéséből adódott. A pontsorhoz illesztett fűrészvonal a periodikusságot szemlélteti.

a monitoron azonosított gép valóságos helyét is megtalálták a tiszta égbolton. A kezdeti bosszúság, hogy a fényképezőgép állványát nem hoztuk az iskolába, egy újabb feladatot jelentett számunkra. Ezt a feladatot meg kellett oldani, hiszen a meteorológiai előrejelzések szerint akár több napig nem találkozhatunk derűs éggel. A reszkető kamera egy kicsit még a biológia felé is elkalauzolt bennünket, ami újabb érdekességek felé irányította a diákok figyelmét.

A radarképen feltűnő sebességérték a mérések ellenőrzését tette lehetővé. A vizsgált repülőgép a megfigyelés 3 perces szakaszában egyenes vonalú egyenletes mozgást végzett. Erről úgy győződünk meg, hogy a repülő pályáját kirajzoltattuk a képernyőre, a sebesség- és a magasságértékeket folyamatosan rögzítettük. A tanulók többsége megdöbbsent, amikor ráébredt, milyen nagy forgalom zajlik a fejük felett, távoli országok utasait szállítva a célállomásig.

A konkrét méréseket tervezés előzte meg, megvittattuk, milyen módszereket fogunk alkalmazni a mérések során, a mérések után pedig az adatok kinyerése és hosszabb kutatómunka következett. Az elemzések is izgalmasak voltak, hiszen mindenki kíváncsi, mennyire közelítik meg eredményeink az internetes sebességértéket.

Végeredményben egy fantasztikusnak tűnő ötletet sikerült kivitelezni, amely siker úgy hiszem a diákok későbbi munkáinál is hasznos lehet: az aktuális feladatoknál törekedni fognak a felmerülő nehézségek leküzdésére.

Irodalom

1. <http://www.nagyutazas.hu/magyar/repulojegy/radar/>
<http://www.flightradar24.com>
2. <http://www.techsmith.com/download/camtasia/default.asp>
3. <http://www.opensourcephysics.org/items/detail.cfm?ID=7365>
4. http://hu.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380#M.C5.B1szaki_adatok

HETEDÍZIGLEN »FIZIKASHOW« A BAJAI SZENT LÁSZLÓ ÁMK-BAN

Jaloveczki József
Szent László ÁMK, Baja

„Új törvényekkel, túl a szűk egen,
új végtelent nyitottam én eszemnek;”

Babits Mihály: Bolyai

Az idén, 2013. április 24-én immár hetedik alkalommal rendeztük meg iskolánkban a hagyományosnak nevezhető *Fizikashow*-t. A tanulóikísérlet-bemutató eredeti célja a fizika népszerűsítése, megkedveltetése

volt intézményünk és a város tanulóifjúsága körében. Az utóbbi években mellé kémiabemutatókat is szerveztünk, az idén *Biológiashow*-val bővült a repertoár.

Kísérletezők

A kísérleti napon mintegy 110 tanuló munkálkodott folyamatosan. Közülük körülbelül harmincan fizika- és tizenketten kémiaszakkörösök. Életkorukat tekintve a legifjabbak 6. osztályosok voltak, de sokan vettek részt az idei tanévben (2012/13) érettségizők közül is. A bemutató alatt jó hangulatban dolgoztak,

Köszönöm a show megrendezésében résztvevő kémia- és biológiaszakos kollégáknak, hogy munkájukkal szebbé, színesebbé és izgalmasabbá tették ezt a rendkívüli napot. Köszönöm az intézmény fenntartójának és vezetésének, hogy anyagilag is támogatta ezt a reálműveket népszerűsítő napot (a show körülbelül 100 ezer Ft-ba került). Természetesen köszönet illeti az aktív kísérletező tanulókat is, akik sokat dolgoztak az előkészítésen és kitartottak a délután 4 óráig tartó kísérletezésben. A kísérleti bemutatóról további képek, videók a <http://www.fizikashow.hu/main.htm> weboldalon találhatóak.



1. kép. A perdületmegmaradás egy meghökkentő példája.

rendszeresen ismételték a kísérleteket és nem keseredtek el akkor sem, ha valamelyik nem úgy sikerült, ahogy azt megszokták.

Kísérletek

A kísérletek helyszíne a fizikaelőadó-terem, a labor, a díszterem és az udvar volt. A fizikakísérletek között számos olyan is bemutatásra került, amelyeket már korábban is láthatott a közönség (1. kép). Azonban több új kísérlet is került a műsorba (2. kép). A fizikaórákon is előforduló kísérletek mellett kevésbé ismert, internetes kalandozásból származó is akadt.

A kísérletek órai bemutatásra is alkalmasak, ezért néhány népszerű kísérlet rövid ismertetésével szeretnék segíteni az érdeklődőknek, tanár kollégáknak.

Kísérlet plazmagömbbel

A kereskedelemben 4-5000 Ft-ért beszerezhető plazmagömb látványosan csábítja a fiatalokat a fizikához. A plazmagömb elképesztő fényjelenségeket mutat és a jelenségek megértése felöleli a fizika számos területét. Az eszköz egy nagyobb (körülbelül 20-30 cm átmérőjű) üveggömbből és belsejében egy kis üveggömbből áll, általában csökkentett nyomású közömbös gázzal (például neon) töltve. A plazmagömb közepén lévő kis üveggömb szolgál az elektromágneses tér keltésére, ahonnan kisülések indulhatnak a külső ballon falára. A plazmagömb indukciós gerjesztésére 15-16 kHz frekvenciájú, 15-20 kV nagyságú váltakozó feszültséget alkalmaznak a mintegy 0,5 bar nyomású töltőgáznál. A kis gömb belső tere az üvegfalal alkotott kondenzátor külső fegyverzete, míg a másik oldalon a gömb gáztér a fegyverzet. Ezen a körülbelül 200 pF-os kondenzátoron kerül a nagyfeszültség (15-16 kV) a gáztérbe, amelyet az elektromágneses tér ionizál. A külső ballon üvege, falvastagságtól függően körülbelül 1500 pF nagyságú kondenzátort alkot. A külső fegyverzet maga a légtér, amely az itt is ható kismérvű gerjesztés miatt vezet, és az áramkört a generátor földelt oldalához zárja. A levegőn történő földelés csak a fonálszerű kisülések kialakítását biztosítja, azonban a külső ballonfelület kézzel történő érintésekor az egyensúly felborul. Tesztünk, amely a levegőnél sokkal jobban vezet, az érinté-



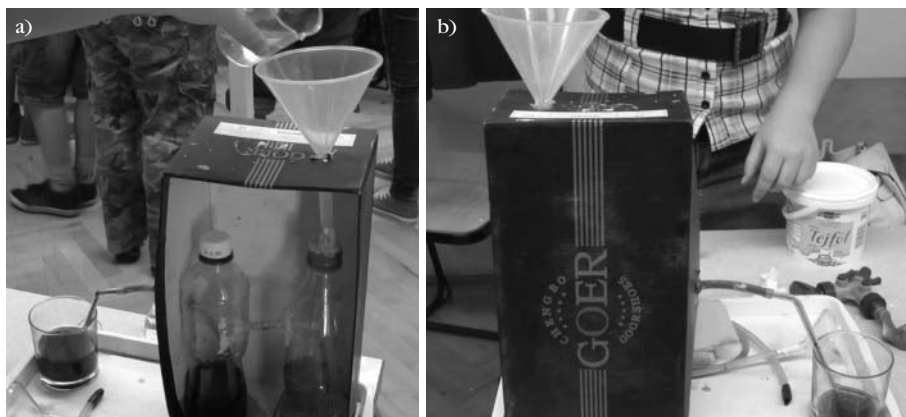
2. kép. Állóhullámok fűrógéppel, gumiszálon.

si ponton – a kisebb ellenálláson – keresztül földeli a gömb külső környezetét, eltorzul a nagyfrekvenciás tér, amelynek eredménye a felerősödött kisülés az érintési hely felé. A kisülésben az áram annyira megnő, hogy kezünk a ballon melededését hosszabb idő után nem bírja elviselni [1].

Ha az üveggömb külső felületére fémot, például alufóliát fektetünk, a fém külső felületén megjelennek az üveg külső felületén keletkező indukált töltések. Ha a fémlmezre szigetelőt (például papírlapot) fektetünk, akkor ezzel egy újabb kondenzátort hozunk létre (a másik fegyverzet a levegő). Ha egy tüvel közelítünk a papírlap (dielektrikum) felé, úgy a nagy térerősségnek köszönhetően szikrázást, csúcskisülést láthatunk (mi földelünk a tűn keresztül). A kisülés árama, energiája olyan nagy lehet, hogy a papírra szöveget égethetünk (3. kép).

3. kép. Plazmagömbre alufólia, szigetelő és tüvel kisülés.





4. kép. a) A borautomata belülről ... és b) ami a látogatókat meglepte: vízből bor.

fogató vörösbort nyom át a pohárba. Ilyen módon tudta Héron a vizet borra változtatni [2].

„Varázslás” golyókkal

Egy másik meglepő és egyszerűen kivitelezhető kísérlet a *varázslatos golyók*. Szakkörön, bemutatókon egyszerűen elvégezheti bárki, anyagköltsége nem jelentős, könnyen beszerezhető.

A kísérlethez fogtunk egy nagyobb, lezárható fedelű

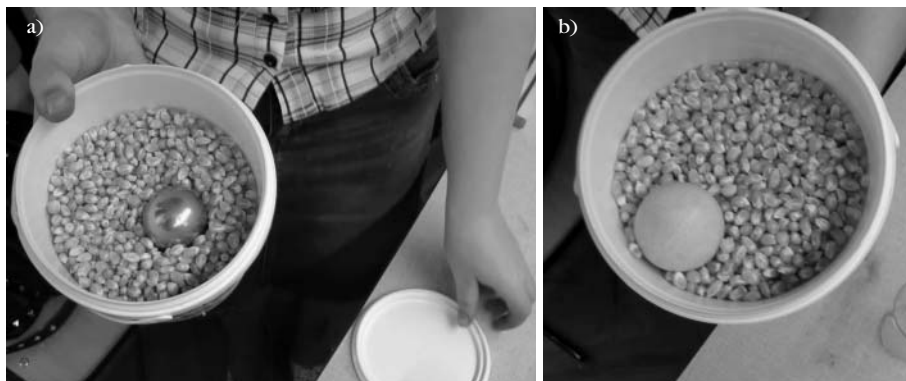
Borautomata

Egyszerű, mégis meghökkentő kísérlet az úgynevezett borautomata. A víz és a levegő kölcsönös kiszorításával lehetőség nyílik italautomata előállítására. Ehhez két egyforma műanyag palack (mi félliteres palackokat használtunk) függőleges oldalfalának felső részén, azonos magasságban, lyukat fúrunk. Ezekbe a lyukakba vízszintes helyzetben egy-egy rövid, kis belső átmérőjű üvegcsövet ragasztunk. A két csődarabot összekötjük egy rövid gumicsővel. Lehet egy keményebb műanyag cső is, fontos azonban, hogy a palack falánál jól szigeteljünk, például szilikonos tömítővel! Az egyik palackot lezárjuk egy átfúrt dugóval. A dugón keresztül vezetünk (szigetelés!) egy, a felső részén tölcserben végződő függőleges helyzetű hosszú üvegcsövet, amely leér egészen a palack aljáig. A másik palackot az összekötő csővel szemközti oldalfalának alsó részén átfúrjuk. Ebben a lyukba egy olyan csövet ragasztunk, amely derékszögben meghajlik és felfelé irányul. A palack kiöntő nyílása alatt körülbelül 5 cm-rel meghajlítjuk a csövet úgy, hogy néhány centiméter hosszan vízszintesen fusson, majd ismét derékszögben, kifolyó nyílásával lefelé fordítjuk. A nyílás alá egy átlátszó üvegpoharat helyezünk. A második palackot a felső cső nyílásáig töltjük festett vízzel (vörösborral). Ezután lezárjuk a palackot a csavaros kupakjával (4.a kép). Az egész elrendezést lefedjük egy kartonpapírral (dobozzal) úgy, hogy csak a tölcser és a második palack kifolyónyílása legyen látható. Töltsünk most vizet a tölcserbe! Meglepődve tapasztaljuk, hogy a „borautomatából” festett víz (vörösbor) folyik a pohárba. Éppen annyi vörösbor lesz a pohárban, mint amennyi vizet a tölcserbe töltöttünk. Az első palackba töltött víz térfogatával egyenlő térfogatú levegő áramlik át a másik palackba (4.b kép). Ez a levegőmennyiség ugyanakkora tér-

hengeres műanyag edényt (megfelel egy nagy tejfőlös edény is). A végrehajtáshoz szükséges még egy pingponglabda, valamint egy körülbelül azonos méretű vas- vagy acélgolyó. Vásároljunk annyi pattogatni való kukoricát, hogy az edényt körülbelül $\frac{3}{4}$ részéig meg tudjuk tölteni. A kukoricát nem kell kipattogatni, viszont mosószerrel többször meg kell mosni, hogy a szemek ne tapadjanak össze. A megszáritott kukoricát töltjük az edénybe. Tegyük bele a pingponglabdát és nyomjuk bele alaposan a kukoricába. Ezután helyezük a szemek tetejére az acélgolyót, ami kissé besüpped, de nem süllyed el (5.a kép). Tegyük rá a tetejét (előtte mutassuk meg a hallgatóságnak, hogy ott a tetején a nehéz golyó, de lehetőleg ne tudják, hogy alul benne pingponglabda is van), majd mixelős mozdulatokkal alaposan forgassuk meg az edényt, hogy mozogjanak a szemek. A fedél levétele után a közönség csodálkozva észleli, hogy az acélgolyó pingponglabdává „változott” (5.b kép). A magyarázat egyszerű fizika, hiszen az acél (vas) sűrűsége sokkal nagyobb, mint a kukoricáé, a pingponglabda sűrűsége jóval kisebb. A szemek közti súrlódás átmenetileg gátolja a nehéz golyó lesüllyedését és a könnyű labda felemelkedését. A rázás, mixelés hatására a szemek elcsúsznak egymáson, ami lehetővé teszi a golyók cseréjét [3].

A kísérletek ötletének egy része a fizikatanításban alapműként használt könyvekből való [4] más részük egyéb forrásból [5] származik.

5. kép. a) Acélgolyó a pattogatni való kukoricán... b) rázás után helyet cserél a pingponglabdával.





6. kép. „Érzékek birodalma” a Biológishown.



7. kép. A bátrak bekötött szemmel keresték.

A kémiai kísérleteket 6–9. évfolyamos kémiaszakkörös tanulók és egy idén kémiából érettségiző tanuló mutatták be Szabó Attila kémiaszakos kolléga szervezésében és irányításával. A 17 kémiai kísérlet között akadnak jelentős fény- és hanghatással járó redoxi-reakciók (sósavgránát, gumimacik, süvöltő palack, termit, tűzgolyó, hidrogénes lufik), de látványos sav-bázis folyamatok (természetes indikátorok, indikátor szökőkút) és szép kristályosodási, oldhatósági látványfolyamatok (vegyszár virágoskertje, titkosírások, varázsceruza, szökőkutas kísérletek) is.

A kísérletek óránkénti ismétlésben zajlottak a zsúfolt kémiaelőadóban, más részük az udvaron. Az idei tanévben csatlakozott a biológia az eddigi fizika-kémia látványshow-hoz. A biológia szakos kollégák, Sívák Szilvia és Csanádi Zoltán több teremben is szerveztek játékos élményszerző kísérleteket. Sívák Szilvia kolléganő leírása és a látottak alapján igen sikeres akció volt: „A Fizikashow népszerűségén felbuzdulva, valamint tanítványaink érdeklődését és aktivitását kihasználva, jött az ötlet, hogy a biológiát is népszerűsítsük diák kísérletekkel. Diákjaink mikroszkópos metszeteket mutattak be, Donders-féle tudómodell működését magyarázták el, valamint nyugalmi és terhelés alatti vérnyomásmérést és egyszerűbb reflexvizsgálatokat próbálhattak ki a látogatók.

A másik irány főleg a kisebbeket (5–8. évfolyam) és a más irányú érdeklődési körrel bíró diákokat és tanárokat célozta meg. Ez esetben az élettan egy szeletét – jelen esetben az érzékszervek témakörét kiragadva élményszerű utazáson vehettek részt a látogatók az „Érzékek birodalmába”. A diákok szemét bekötöttük és „látó” társuk vezetésével különböző feladatokat kellett megoldaniuk: kóstolni, megkülönböztetni fűszereket illat alapján (6. kép), különböző hangokat felismerni, tapintással tájékozódni, olvasni vagy párt keresni. A legnépszerűbbnek a „bátorságpróba” bizonyult, ahol kis tárgyakat kellett kikutatni különböző közegekben (7. kép, a csiriz igen maradandó élmény

volt ☺). A koszos kis mancsok lemosására kétféle hőmérsékletű vizet használtunk és közben elmagaráztuk hőmérséklet-érzékelésünk relativitását.

Egy másik teremben az egyik diák a vakfoltvizsgálatot mutatta be, egy másik a szemmel kapcsolatos érzékcsalódásokkal kápráztatta el a látogatókat. A harmadik diák a 3D-s képek világába kalauzolta el az érdeklődőket: a paralel és cross képlátások elsősorban keveseknek sikerültek, ők az élmény érdekében kölcsönkaptak 3D-s szemüveget.”

Látogatók

Osztályok, csoportok jelentkeztek a város általános és középiskoláiból. A bemutató teljes bejárásához legalább 2-3 tanóra kellett. A legifjabb vendégek iskolánk ovisai (körülbelül 30 fő) voltak, akik fárasztó séta után is lankadatlan figyelemmel és lelkesedéssel nézték, próbálták a kísérleteket. A jelentkezések alapján becsült látogatói szám meghaladta a 800 főt. A helyi televízió az esti híradóban képes riporttal számolt be a nap eseményeiről, kísérletező diákok interjúival. Figyelemre méltó, hogy a híradásban hagyományá vált eseményként ajánlották a nézők figyelmébe a rendezvényt. A helyi nyomtatott sajtó és az internetes lapok is beszámoltak az eseményről.

Nyugodtan megállapíthatjuk, hogy 2013. április 24-én jelentős természettudományi népszerűsítő rendezvény volt Baján, a Szent László Általános Művelődési Központban.

Irodalom

1. <http://users.atw.hu/majki/elektro/cikkek/plazma.pdf>
2. Hans-Joachim Wilke: Látványos kísérletek műanyag palackokkal. *Fizikai Szemle* 50/5 (2000) 169.
3. <http://www.youtube.com/watch?v=JypQCISiXTk>
4. Juhász A. (szerk.): Fizikai kísérletek gyűjteménye 1–2–3. Arkhimédész Bt., Typotex Kiadó, Budapest, 1995–1996.
5. C. Siddons: *Fizikai kísérletek*. Novotrade kiadó, Budapest, 1991.

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II.emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

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

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

TÓTH FERENC, 1932–2013

Az egykori MTA KFKI nyugalmazott osztályvezetője, *Tóth Ferenc* fizikus 2013. június 3-án, életének 82. évében elhunyt.

Tóth Ferenc az ELTE-n szerzett fizikus diplomát 1955-ben. Az egyetem elvégzése után egy évig az Egyesült Izzóban dolgozott, majd 1956-ban a KFKI-ba került és innen ment nyugdíjba 1995 körül, de utána is aktívan bejárta az intézetbe dolgozni legalább heti három-négy napra, még a halálát közvetlenül megelőzően két hónappal is.

A fizikusképzésben szerzett ismereteit háttértudásnak tekintve, a gyakorlati kérdések, különösképpen az elektronika iránti érdeklődése szabta meg egész életében tevékenysége fő irányát: lényegében mindvégig magas színvonalú, alap- vagy alkalmazott kutatást segítő villamosmérnöki fejlesztő munka végzésében érezte igazán kibontakoztatva a képességeit. Az ezen a területen megszerzett alapos ismereteit szívesen adta át a fiataloknak is: az ELTE fizikus hallgatói részére az 1970-es években elektrotechnika előadást és gyakorlatot tartott, majd a KFKI-ban osztályvezetőként számos fiatal villamosmérnök szerzett a keze alatt olyan szakmai tapasztalatot, amely alapján később maguk is fejlesztőmérnöki vezetői pozíciót tölthettek be más kutatóintézetekben vagy vállalatoknál. Egy elektroműszerész/technikus generációt is kinevelt maga körül, akiknek alkotó tevékenysége igen lényeges hozzájárulást jelentett a KFKI-ban folyó kísérleti kutatás magas szinten tartásához. Munkájával példát mutatva, beosztott munkatársaival szemben is komoly elvárásai voltak, viszont mindig kiállt az érdekeikért, szükség esetén támogatta őket, amint azt – hálával visszagondolva – magam is megtapasztalhattam. Mindenki szívesen dolgozott nála, aki hozzákerült. Vezetői és emberi tulajdonságainak megbecsültségét jelzi, hogy a 75. és 80. születésnapjára szervezett összejövetelekre szinte minden volt munkatársa eljött.

A KFKI-ba kerülve a kezdeti időszakban a szélesjelű (folytonos gerjesztésű) mag mágneses rezonancia (NMR) spektroszkópia itthoni kísérleti alapjainak megteremtéséhez szükséges elektronikai fejlesztések határozták meg a tevékenységét. A zajszint alatti jelek detektálásához például szükség volt az úgynevezett „lock-in” technika megvalósítására. A megépített lock-in berendezés (egyéb fejlesztéseivel, például a hőmérséklet-

szabályozókkal együtt) a KFKI műszaki részlegeinek hosszú időn át gyártott és külföldre is szállított termékei lettek. Az NMR-spektroszkópia hazai megvalósításához való hozzájárulásáért (*Tompa Kálmánnal* együtt) 1970-ben megkapta az akkor első ízben kiosztott KFKI Intézeti Díj I. fokozatát. 1968-ban fél évet töltött az angliai Nottinghami Egyetemen, az NMR-fejlesztés egyik fellegrárában, ahol akkor már az NMR-technikán alapuló MRI-eljárás kidolgozásán dolgozott az ezért 2003-ban Nobel-díjat elnyerő *Peter Mansfield*.

Tóth Ferenc itthon is megpróbálta gyakorlati célokra hasznosítani az NMR-módszert, az 1970-es években Tompa Kálmánnal és munkatársaikkal együtt megépítettek egy szabadalmaztatott NMR nedvességmérő berendezést, amit az 1977. évi budapesti 5. Nemzetközi Mezőgazdasági, Élelmiszeripari Gép- és Műszerkiállításán I. Díjjal jutalmaztak.

Az 1970-es évek elején a KFKI-ban előtérbe került a memórianyagok kutatása, aminek az előmozdítására az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság támogatásával létrejött a KFKI memória célprogram. Ennek keretében hívták életre Tóth Ferenc vezetésével a Mé-

résfejlesztési Osztályt a huzalmemória kifejlesztésére. Ez az akkor élenjáró alkalmazott kutatás igen magas színvonalú (mai szóval „high-tech”), kereskedelemben nem kapható (és az akkor a szocialista országgal szemben érvényben lévő úgynevezett COCOM-listás embargó miatt lényegében beszerezhetetlen) elektronikai vizsgálóberendezések kifejlesztését tette szükségessé az elektrokémiai leválasztással egy vékony vezető huzalra felvitt hengeres permalloy réteg (a tulajdonképpeni mágneses tárolóelem) folyamatos gyártás közbeni ellenőrzésére, valamint a memóriacélra történő utólagos tesztelésére. Értelemszerűen ez a fejlesztési tevékenység elektronikai érdeklődésű szakembereket kívánt, akik ugyanakkor fizikusként a mágnesesanyag-tárolóelem viselkedését is ismerték és értették. A huzalmemória-fejlesztésért felelős Tóth Ferenc ezen felül a tárolóegység elállítási technológiáját kidolgozó vegyészek, gépészmérnökök munkáját is koordinálta. A csoport mintegy öt évig tartó sikeres fejlesztésének eredményességét 1974-ben a KFKI Intézeti Díj I. fokozatával ismerték el. Én magam is nála készítettem ebben a témakörben a diplomamunkámat és a doktori értekezésemet, az utóbbihoz kapcsolódó és általa irányított, *Kádár Enikő*vel



közösen végzett tevékenységemet szintén KFKI Díjjal jutalmazták 1976-ban.

A huzalmemória-program befejeződése után nyugdíjazásáig fő érdeklődési területe – az általános célú kutatási segédeszközök (például mágnes tápegységek) tervezésén túl – a roncsolásmentes anyagvizsgálat és az erre alkalmas berendezések kifejlesztése lett. Főleg az örvényáramú, valamint a Barkhausen-zaj analízisen alapuló metodikákkal foglalkozott, számos ilyen berendezést tervezett és épített munkatársaival, amelyeket még ma is országszerte használnak. Az MTESZ Gépészeti és Anyagtudományi Egyesülete keretében rendszeresen tartott tanfolyamokat ezen módszerek ismeretetésére, amelyekre még 2008-ban is vállalkozott folyamatosan frissülő tananyagokkal. Az OTKA-támogatással létrejött Budapesti Anyagtudományi Műszerközpont *Oktató Műhely Füzetek* sorozatához 1989-ben megírta az *Örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálat* című füzetet, illetve számos írást jelentett meg a témában hazai műszaki szaklapokban is.

Az említett magyar nyelvű munkák mellett hús angol nyelvű, főleg nemzetközi folyóiratokban megjelent tudományos publikációnak is társszerzője volt (cikkeinek és hivatkozásainak listája elérhető a <http://www.szfki.hu/HU/metalsres> honlapon). Mivel a hasznos dolgok létrehozására irányuló műszaki alkotás-vágy volt munkásságának fő éltetőeleme, ezért tudományos publikációk írása helyett inkább kutatási és

anyagvizsgálati berendezések tervezésére és építésére, illetve az ezekhez kapcsolódó szabadalmak elkészítésére fordított nagyobb figyelmet, több témakörben lévén társszerzője szabadalmaknak (NMR nedveségmérő, SEMILAB mélynívó-analízis berendezés és eljárás, roncsolásmentes vizsgálatok).

Tudományos publikációi közül említésre méltó az utolsó, egy hosszú ideje külföldön dolgozó volt intézeti kollégával közös munkája [G. Forgács és mtársai., *Rev. Sci. Instr.* 74 (2003) 4168.] a sejten belüli roncsolásmentes vizsgálatokat elősegítő „mágneses csipesz” megépítéséről, aminek 70 körüli független hivatkozással komoly visszhangja is van. Amikor egyik amerikai látogatásom során *Forgács Gábor* említette egy ilyen eszköz megépítésének ötletét, örömmre szolgált, hogy Tóth Ferencet ajánlhattam a kivitelezésre, mert biztos voltam benne, hogy nyugdíjasként is aktív maradva, lelkesen fog nekiállni a feladatnak.

Ebből is kitűnik, hogy az új dolgokra való nyitottság jellemezte tevékenységét egész életében, emiatt dolgozott szívesen az intézetben szinte az utolsó pillanatig, örömmel újságolva mindig, hogy az általa épített berendezések javítása, továbbfejlesztése ügyében még az utóbbi időben is sok helyről megkeresték. Ezt a végig töretlen hozzáállását az alkotómunkához példaként állítva őrizzük meg kedves, szerény személyiségét emlékezetünkben.

Bakonyi Imre

FERCSIK JÁNOS, 1932–2013

Fercsik János, a Dunaújvárosi Főiskola nyugalmazott tanára 2013. július 27-én örökre eltávozott.

Kurta önéletrajzát így kezdte: „A születés és a halál időpontjai közé bezárt minden rövidke *élet* (mint az alább részletezett saját *lét*) csak egy parányi mozzanat az előtte és utána ásító végtelen *nemlét*ben. ...

50 és fél tanévet tanítottam. Érettségiztettem 18 gimnáziumi osztályt, tanítottam és vizsgáztattam 6540 főiskolai hallgatót. Bírálója voltam 36 aspiránsnak. Minden rangot és tisztséget elértem, amire vágytam, amire tehetségemből futotta... Írtam sok számítógép-programot, két tucat könyvet, számtalan főiskolai jegyzetet és példatárat. ...

Alig egy évvel vagyok fiatalabb a magyar hangosfilmnél!”

1932. augusztus 12-én Békéscsabán született, Szegeden szerzett fizika-kémia szakos tanári diplomát. Hivatását Békésen kezdte gyakorolni, ahol közel egy évtizedet tanított a neves egyházi gimnáziumban. Ek-



kor azonban már megkezdte tanulmányait a BME-n, ahol villamosmérnöki diplomát kapott. Dunaújvárosban 1964 szeptemberében kezdett el dolgozni az újonnan alakult Felsőfokú Kohóipari Technikumban, amely 1969-ben a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetem Kohó- és Fémipari Főiskolai Kara lesz, ahol 1975-ig a Matematika-Fizika Tanszék tanszékvezető docense. 1973-ban az MTA Tudományos Minősítő Bizottsága a neveléstudományok kandidátusává nyilvánította, emellett 1974-ben az ELTE-n a bölcsészettudományok egyetemi doktora címet szerezte meg. A doktori cím megszerzése után főiskolai tanárrá nevezték ki 1975-ben; 1991 és 1994 között a Miskolci Egyetem Dunaújvárosi Főiskolai Kar főigazgató-helyettese volt; 1997-től egészen 2000-

ig a Számítástechnikai Csoport vezetője, majd 2001-ig az önállóvá váló Dunaújvárosi Főiskola Számítástechnikai Tanszék tanszékvezetője. 2005-ben, nyugállományba vonulásával felhagyott az oktatással.

Fáradhatatlan tanár, jó pedagógus volt. A diákok szerettek órára járni. Élmény volt őt hallgatni, előfordult, hogy a hallgatókon kívül más is beült az előadóterembe, hogy vele együtt átéljék a már művészi előadást. „A színész, a pap és a tanár ugyanarról a töről való, hiszen hivatásuk az, hogy átadják az ismeretet.” – ezek az ő szavai voltak, amelyet akkor mondott, amikor óráiról, a tanítás szépségéről kérdezték. És valóban, nem pusztán kötelesség és megélhetés volt számára a katedra, hanem hivatásának megélt szintere. Számos szakkört vezetett, részt vett a diákmunkában, kinevelt egy fiatal, dinamikus csapatot, amelynek önzetlenül adhatta tovább a stafétabotot.

Két említésre méltó munkáját emelném ki:

Az egyik a fizikához kapcsolódik; úgy tudta átadni ismereteit e tudománnyal kapcsolatban, mind tanítása során, mind pedig könyvében (*A relativitáselmélet szemlélete* – Magvető, 1977), valamint jegyzeteiben,

hogy az érhetővé vált mindenki számára, lenyűgözte a hétköznapi embert is. Ez a készség nem mindenkinek adatik meg, és lehet, hogy mások, fizikusok, tudósok ugyanolyan lelkesedéssel végeztek, végeznek kutatásokat, amelyek haszna nem kétséges, ám annak továbbadása, a széles közönséggel való megszeretése is van olyan fontos a jövőnk építése szempontjából, és ebben ő valóban kiemelkedő volt.

A másik jelentős munkássága az volt, hogy a legelső között ismerte fel a személyi számítógépek korszakalkotó fontosságát; úttörője volt a számítástechnikai oktatás bevezetésének és elsőként kezdte el a Főiskolán kidolgozni és bevezetni az e-learninges oktatási módszert.

2013. július 27-én hirtelen ment el. Az ő szavaival zárom soraimat: „...ha ránk emlékeznek, akkor már nem éltünk hiába.”

Fercsik Marianna

AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

Tudománytörténeti jelentőségű hely az MTA Atomki főépülete

Az Európai Fizikai Társulat (European Physical Society, EPS) a fizikai kutatások kiemelkedő jelentőségű tudománytörténeti helyévé (EPS történelmi emlékhely) nyilvánította az MTA Atommagkutató Intézet (MTA Atomki) főépületét. Az ezt tanúsító emléktáblát az Atomki Bem téri bejáratának előkertjében *John Dudley*, az EPS elnöke avatta fel 2013. október 25-én mintegy 120 fő jelenlétében.

1956 őszén az épületben folytatta az intézetet megalapító *Szalay Sándor* és akkori doktorandusza – az emléktábla-avatáson is jelen lévő – *Csikai Gyula* azokat a magfizikai kísérleteket, amelyek során béta-bomlási eseményeket fényképeztek le egy expanziós ködkamra segítségével. A ${}^6\text{He}$ radioizotóp béta-bomlási folyamatáról készült fényképfelvételeket tanulmányozva megfigyelték, hogy a ködkamrával detektálható ${}^6\text{Li}$ maradékmag és a béta-részecske (elektron, e^-) nyoma nem esik egy egyenesbe. Tehát a lendületmegmaradás (és az energiamegmaradás) törvénye csak abban az esetben teljesülhet, ha keletkezik egy nem detektált harmadik részecske is, ami elviszi a hiányzó lendületet (és mozgási energiát). Ez a részecske a *Wolfgang Pauli* által még 1930-ban megjósolt neutrínó. Ily módon *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* a neutrínók visszalökő hatására kapott fotografikus bizonyítékot.

A rövid időn belül közzétett és hamar híressé vált fényképfelvételeikkal *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* a világon elsőként erősítette meg a *Clyde L. Cowan* és

Frederick Reines által vezetett kutatócsoport alig néhány hónappal korábban, 1956. július 20-án publikált eredményeit a neutrínók létezésének kísérleti bizonyításáról. 1995-ben F. Reines fizikai Nobel-díjat kapott a neutrínók létezésének kimutatásáért, ami jól mutatja, hogy *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* eredményei valóban jelentős mértékben járultak hozzá a modern fizika megalapozásához.

1962-ben *Leon Lederman*, *Melvin Schwartz* és *Jack Steinberger* kísérletei bebizonyították, hogy müon-neutrínók is léteznek, 2000-ben a tau-neutrínókat is sikerült kimutatni. A három fajta neutrínó és az antirészecskéik által alkotott család 6 tagból áll a részecskefizika Standard Modelljében. Precízebb megfogalmazásban tehát ma azt mondhatjuk, hogy a ${}^6\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + e^- + \bar{\nu}_e$ bomlási folyamat során keletkező elektron-antineutrínó ($\bar{\nu}_e$) visszalökő hatását sikerült megfigyelni a híressé vált debreceni kísérlet során.

A *Csikai Gyula* és *Szalay Sándor* által készített felvételek egyike később bekerült a tankönyvekbe és mára az egyetemes fizikatörténet részévé vált a kísérletük. A *Simonyi Károly* által egykor megadott közérthető magyarázattal kiegészített fénykép ezért felkerült az emléktábla bal oldalára is.

Az MTA Atomki jelenlegi igazgatója, *Fülöp Zsolt* által vezetett táblaavató ünnepségen *John Dudley* arról is szólt, hogy az MTA Atomki Magyarországon az első, Európában pedig a tizedik olyan kutatóhely, amely elnyerte a kitüntető címet. A 42 európai ország fizikai társulatait és mintegy 130 ezer fizikust tömörítő EPS új kezdeményezése tudománytörténeti jelentőségű helyé nyilvánítani azokat a jelentős fizikai műhelyeket, amelyekben a múltban is kiemelkedő eredmé-

Az EPS emléktábla avatásához kapcsolódó tudományos ülés lebonyolítása részben az MTA Atomki által elnyert TÁMOP-4.2.3-12/1/KONV-2012-0057 projekt támogatásával valósult meg.

nyek születtek, és a jelenben is fontos kutatások folynak. Eddig összesen 40 ilyen elismerés odaítéléséről döntött a társulat.

Az ünnepségen másodikként *Pálinkás József*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke mondott beszédet. Pálinkás József, aki korábban az MTA Atomki igazgatója is volt, majd Szalay Sándort és Csikai Gyulát követte a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékének élén, kiemelte, hogy Csikai Gyula és Szalay Sándor eredményei és munkássága tették lehetővé a debreceni kísérleti magfizikai iskola létrejöttét, felvirágzását és a kutatóműhely nemzetközi hírűvé válásában is igen jelentős szerepük volt. Az évtizedek során az iskola tudományos kutatók és fizikatanárok nemzedékeit nevelte ki, akik ma is fontos szerepet játszanak a nemzeti és az egyetemes természettudományos kutatás, oktatás és a kulturális élet különböző területein.

Az emléktáblánál harmadikként *Papp László*, Debrecen Megyei Jogú Város alpolgármestere mondott beszédet, amelyben kiemelte, hogy a több évszázados tudományos, oktatási és kulturális hagyományokkal rendelkező cívisváros számára ma is igen fontosak az MTA Atomkiban folyó kutatások.

Negyedikként a 2013. október 31-én 83. születésnapját ünneplő *Csikai Gyula* lépett a mikrofonhoz. Köszönetet mondott az Európai Fizikai Társulatnak az elismerésért, majd megemlékezett az 1987. október 11-én elhunyt Szalay Sándorról, aki a kísérlet ötletét adta. Ezt követően köszönetet mondott a ködkamra kifejlesztésében résztvevőknek, végül mindazon személyeknek, intézményeknek és szervezeteknek is, akik közreműködtek az EPS döntésének előkészítésében és az ünnepi esemény lebonyolításában.

Az ünnepséget tudományos ülés követte, amelyet *Króó Norbert*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat leköszönő elnöke nyitott meg kiemelve, hogy Szalay Sándor és Csikai Gyula példája is jól mutatja, hogy milyen nagy szerepe van a kreativitásnak és az elhivatottségnek a kutatói-oktatási és kutatásszervezői munka során.

Lovas Rezső, az MTA Atomki korábbi igazgatója a Csikai–Szalay-kísérlet legfontosabb részleteit ismertette, majd a részecskefizikai, valamint a magfizikai vonatkozásokat foglalta össze. Beszélt arról is, hogy a

Csikai Gyula emeritus professzor emlékezik vissza a tudománytörténeti jelentőségű kísérletre. Fotó: Nagy Gábor.



John Dudley, az EPS elnöke leleplezi a fizikai kutatások kiemelkedő jelentőségű tudománytörténeti helyszínét jelölő táblát. Nagy Gábor felvétele.

gyenge kölcsönhatás tulajdonságainak megismerése szempontjából 1956 különösen fontos esztendő volt. A neutrínók létezését bizonyító eredmények publikálásának évében dolgozta ki *Chen Ning Yang* és *Tsung-Dao Lee* is azt az elméletüket, amely szerint a gyenge kölcsönhatás sérti a tértükrözési szimmetriát, és 1956-ban a *Chien-Shiung Wu* által vezetett amerikai csoport kísérleti úton ki is mutatta, hogy a ^{60}Co radioizotóp béta-bomlása során valóban sérül a szimmetria és a paritás nem megmaradó mennyiség.

A tudományos ülés további részében *Marco Pallavicini* (Dipartimento di Fisica, Università di Genova, Olaszország) a modern neutrínókísérletekről adott összefoglaló ismertetést, majd *Stefan Schönert* (Physikdepartment E15, Technische Universität München, Németország) a részecskefizika Standard Modelljének érvényességi körén túli területekre vezető Majorana-neutrínók kimutatását célzó legújabb kutatási eredményeit és a kutatás stratégiáját ismertette.

A tudományos ülést követő állófogadáson *Gaál István*, a Debreceni Egyetem Tudományegyetemi Karok részlegének elnöke mondott pohárköszöntőt, majd az egykori és mai munkatársak, barátok és tisztelők köszöntötték Csikai Gyulát, az MTA és az Európai Akadémia tagját, az egykori Kossuth Lajos Tudományegyetem volt rektorát, a Debreceni Egyetem és az MTA Atomki emeritus professzorát.

Az ünnepség ideje alatt a résztvevők megtekinthették a híressé vált kísérlet során is használt Wilson-féle expanziós ködkamrát.

Készült egy weboldal is (http://www.atomki.mta.hu/EPS_Historic_Site/index.html) a kitüntető cím elnyerése alkalmából.

Csikai Gyula és Szalay Sándor kísérleteiről a *Fizikai Szemle*ben legutóbb 2005-ben a 10. számban jelent meg összefoglaló. A cikkből is kitűnik, hogy milyen nagy szerepe volt a két debreceni fizikus elszántságának, találékonyságának és a nagyszerű technikai megoldásoknak abban, hogy a Szalay Sándor által még 1951-ben felvetett kísérleti ötlet egyáltalán megvalósulhatott, ráadásul világra szóló jelentős eredmények születhettek az 1950-es években is igen szerénynek számító lehetőségek mellett.

Fenyvesi András, MTA Atomki

A FIZIKAI SZEMLE LXIII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<p><i>A. Szála Erzsébet</i>: Szily Kálmán emlékezete 242</p> <p><i>Abonyi Iván</i>: Megemlékezés Kármán Tódorról halálának ötvenedik évfordulóján 342</p> <p>Alázatra nevel, ha egy lapon említenek a félistenekkel – <i>Edwin F. Taylorral Bokor Nándor</i> beszélget 200</p> <p><i>Baji Zsófia, Mikula Gergő János</i>: Rétegépítés atomi pontossággal a mikro- és nanotechnológiában 305</p> <p><i>Benedict Mibály</i>: A kvantummechanika a kísérletezők kezében: a 2012-es Fizikai Nobel-díj 413</p> <p><i>Blabó Miklós, Egri Ádám, Horváth Gábor, Barta András, Antoni Györgyi, Kriska György</i>: Hogyan fogható napelemmel bögöly? – I–II. rész 145, 181</p> <p><i>Csebi András, Halász Gábor, Vibók Ágnes</i>: Molekuláris szintű eszközök szerepe napjainkban 409</p> <p><i>Csillag László</i>: Ötven éves az első magyar lézer 197</p> <p><i>Egri Ádám, Horváth Gábor</i>: Gömbhibamentes egy- és kétfókuszúság: a trilobitálenscék magjának optikai szerepe – I–II. rész 226, 298</p> <p><i>Elekcs Zoltán</i>: Rezsiztívlap-kamra, mint gyorsneutron-detektor 42</p> <p><i>Földes B István</i>: Magas harmonikusok és attoszekundumos impulzusok 337</p> <p><i>Földesy Péter</i>: Képkalkotás sok száz giga- és terahertz frekvenciatartományban 405</p> <p><i>Gabányi Krisztina</i>: Páros galaxismagok a megfigyelő csillagász szemével 401</p> <p><i>Geszti Tamás</i>: Hamarosan itt az október, a Nobel-díjak hónapja – a 2012-es fizikai Nobel-díjakról 310</p> <p><i>Hágen András</i>: Az erdélyi iguanodon nyomfossziliából becsült mozgássebessége 234</p> <p><i>Herman Edit, Kádár József, Martinás Katalin, Bezegh András</i>: A kukorica alapú bioetanol magyarországi előállításának exergiaelemzése 125</p> <p><i>Horváth Zsuzsa, Érdi Bálint</i>: Exobolygók a fizika érettségén – I–II. rész 14, 60</p> <p><i>Hraskó Péter</i>: Az óraparadoxonról 374</p> <p><i>Kádár György</i>: A hullámfüggvény tudattól független redukciója 10</p> <p><i>Kálmán Béla</i>: Mi a baj a napfoltokkal? 365</p> <p><i>Kereszturi Ákos</i>: A marsi vizek fizikája 77</p> <p><i>Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Vértess Zofia, Biró László Péter, Bálint Zolt</i>: Színék harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – I–II. rész 231, 293</p> <p><i>Király Márton</i>: Lehetséges megoldások az atomenergia-ipar jelenlegi problémáira – I–II. rész 121, 162</p> <p><i>Kovács László</i>: Eredmények a magyar kristályfizika utóbbi éveiből 7</p> <p><i>Kővári Zsolt</i>: Az Európai Déli Observatórium fél évszázada 56</p> <p><i>Márk Géza, Vancsó Péter, Biró László Péter</i>: Lehet-e tökéletes nanoelektronikai eszközöket készíteni tökéletlen grafénból? 381</p> <p><i>Molnár László</i>: Nap-típusú oszcillációk tengere 116</p> <p><i>Nagy Elemér</i>: CERN-i visszaemlékezések 47</p> <p><i>Nagy Péter, Tasnádi Péter</i>: Parrondo-paradoxon – avagy a kevert stratégiák csodája 37</p> <p><i>Patkós András</i>: Mekkora a kvarkok tömege? 368</p> <p><i>Radnai Gyula</i>: Száz éve történt: hazai tudósítás Laue briliáns ötletéről 311</p> <p><i>Serényi Miklós, Csik Attila</i>: Hidrogéntartalmú amorf szilícium/germánium multiréteg strukturális stabilitása – I–II. rész 194, 222</p>	<p><i>Szabó Róbert, Szabó M. Gyula</i>: Kepler-bolygók kavalkádja 217</p> <p><i>Szatzmáry Zoltán</i>: Mérési eredmények kiértékelése Jánosy Lajos szerint 112</p> <p><i>Szállás Attila, Rátkai László, Pusztai Tamás, Gránásky László</i>: Helikális mintázat eutektikus ötvözetekben 333</p> <p><i>Varga Péter</i>: Esszé a mérésekről, amelyek a Planck-törvény felfedezéséhez vezettek – I–V. rész 1, 51, 73, 109, 149</p> <p><i>Vértess Gábor</i>: Ferromágneses anyagok roncsolásmentes vizsgálata mágneseshisztérezis-állurkok mérése alapján 157</p> <p><i>Völgyesi Lajos</i>: A Föld precessziós mozgása 152</p> <p><i>Völgyesi Lajos</i>: A Föld nutációs mozgása 187</p> <p><i>Wirth Lajos</i>: Kétszázötven éves a newtoni fizika hazánkban – Kerekgedei Makó Pál pályaképe 237</p> <p><i>Zölei-Szénási Dániel, Smausz Kolumbán Tomi, Bari Ferenc, Domoki Ferenc, Hopp Béla</i>: A lézeres szórás interferencia jelenségének felhasználása szöveti vérellátás nagy pontosságú, költséghatékony mérésére 329</p> <p>A FIZIKA TANÍTÁSA</p> <p>56. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató – emlékeztető 72</p> <p>A legnagyobb citromerőmű 269</p> <p><i>Baranyai Klára</i>: Olvadó jéghegyek, melegedő tengerek 267</p> <p><i>Biróné Kabály Enikő</i>: „... jó szóval oktasd, játszani is engedd...” 357</p> <p><i>Boros László</i>: Bélyegék és a fizika oktatása 106</p> <p><i>Csőrgő Tamás</i>: Hogyan csinálhatunk kvarkanyagból Higgs-bozont? – I–II. rész 205, 252</p> <p><i>Egri Sándor, Máth János</i>: Fizikatanítás: mit, hogyan, kinek? 244</p> <p>Eötvös-verseny 2013 – meghirdetés 321, 362</p> <p>Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató – emlékeztető 95</p> <p><i>Füstöss László</i>: Ezredszer ér célba a Fizibusz 173</p> <p><i>Gallai Ditta</i>: Fizika a János-hegyen 26</p> <p><i>Härtlein Károly György</i>: Fakirágy léggömbnek, pizzatávtartóból 144</p> <p><i>Hömöstre Mibály</i>: Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye 392</p> <p><i>Hraskó Péter</i>: Elmékedés a Coriolis- és a centrifugális erőről 168</p> <p><i>Jaloveczki József</i>: Hetedízigen „Fizikashow” a bajai Szent László ÁMK-ban 427</p> <p><i>Jendrek Miklós</i>: Hogyan tanítsuk könnyen, érdekesen a fizikát? 387</p> <p>Károlyházy-feladatok az Eötvös-versenyen – IV. rész, elektromos áram (<i>Radnai Gyula</i>) 18</p> <p><i>Láng Róbert</i>: Látogatás a CERN-ben 23</p> <p><i>Leitner Lászlóné</i>: II. Szalay Sándor Fizika Emlékverseny 63</p> <p><i>Nagy Mária, Radnóti Katalin</i>: Problémamegoldás a Boltzmann-eloszlás témakörében 257</p> <p>Országos Szilárd Leó Fizikaverseny 2012/2013 – emlékeztető 65</p> <p><i>Pál Zoltán</i>: Fejlesztések és kísérletek a „vízugárrakétával” 90</p> <p><i>Piláth Károly</i>: Egy továbbfejlesztett hullámkád 31</p> <p><i>Radnóti Katalin, Király Béla</i>: Modellszámítások az energia oktatásához 422</p> <p><i>Radnóti Katalin</i>: XVI. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – I–III. rész 261, 314, 359</p> <p><i>Riedel Miklós, Ágoston Istvánné, Fekete Pál Péter, Gulácsy Géza</i>: Légnyomás magasságfüggésének mérése a CERN-i tanulmányúton 210</p> <p><i>Riedel Miklós, Barta Zsuzsanna</i>: Az égbolt hőmérsékletének mérése az üvegházhatás vizsgálatára a fizikatanárok CERN-i tanulmányútján 133</p> <p><i>Riedel Miklós, Hollósy Ferenc, Szabolcs Imre, Vantsó Erzsébet</i>: UV-sugárzás mérése a CERN-i tanulmányúton 169</p> <p><i>Simon Péter</i>: Ilyen még nem volt 348</p>
---	---

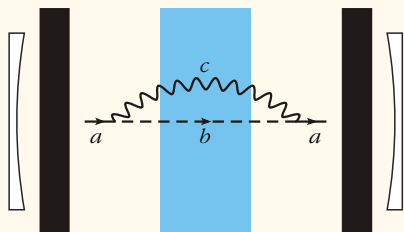
<i>Stonawski Tamás</i> : A követési távolság fizikája	248	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat közhasznúági jelentése	
<i>Stonawski Tamás</i> : Felhők hátán	129	a 2012. évről	281
<i>Stonawski Tamás</i> : Repülőgépek sebességének meghatározása		Át kell alakítani az óriáslézert a magfúzió megvalósításához . .	179
különböző módszerekkel	425	Átadták a Hevesy György-díjakat	215
<i>Stonawski Tamás</i> : „Biztonságos” ütközések	87	Búcsú Sebestyén Ákostól (<i>Frenkel Andor, Szabados László</i>) .	176
<i>Szeidemann Ákos</i> : Fizika és földrajz határán – tanítható-e		Csákány Antalné Lányi Judit, 1934–2013 (<i>Gyulai József,</i>	
a Coriolis-erő?	352	<i>Lévainé Kovács Róza</i>)	397
<i>Tichy-Rács Ádám</i> : A 2012. évi Eötvös-verseny ünnepélyes		DOFFI 2013, avagy fizikus doktoranduszok félig éles	
eredményhirdetése	82	bevetésen (<i>Dávid Gyula, Cserti József</i>)	321
<i>Varga János</i> : Einstein biciklizik – fényképelemzés a fizika		Egzotikus kalciumizotópok tömege információkat szolgáltat	
segítségével	96	a magerőkről	400
VÉLEMÉNYEK		Ericsson-díj 2013 – felhívás díjazandó tanárok ajánlására	106
<i>Bencze Gyula</i> : Csillagok háborúja	386	Európai érdekességek a <i>Europhysics News</i>	
<i>Bencze Gyula</i> : Lesznek-e még marslakók?	204	válogatásában	399, 434
<i>Bencze Gyula</i> : Oppenheimer, a magfizikus	101	Ezüst nanorészecskék fillérékért adnak tiszta vizet	216
Kérdés válasz nélkül (<i>Trócsányi Zoltán, Horváth Dezső</i>) . . .	276	Egy közeli csillag majdnem olyan öreg, mint az Univerzum . .	71
<i>Leitner Lászlóné</i> : Egy természettudományos csoport		Egyedülálló asztrofizikai programban a lendületes	
munkájából	166	kutatócsoport	70
<i>Válas György</i> : A klímaváltozásokról	270	Felhívás javaslatételre (<i>Kürti Jenő, Kamarás Katalin</i>)	104
ÁLFIZIKAI SZEMLE		Fercsik János, 1932–2013 (<i>Fercsik Marianna</i>)	432
<i>Füstöss László</i> : A X. Budapest Szkeptikus Konferencia		Fizikai díjakat adtak át az Akadémián	214
ürügynén	97	Florovium és livermorium, új szereplők a periódusos	
KÖNYVESPOLC		rendszerben	72
Gyulai József: Ifjan – éretten – éltesen (<i>Gergely György</i>)	34	Gyórfy Balázs, 1938–2012 (<i>Gesztai Tamás</i>)	69
Hargittai István: Ambíció és kíváncsiság, avagy mi hajtja		Hogyan kell a vízen járni?	144
a tudományos felfedezőket? (<i>Füstöss László</i>)	66	Honoris causa Jedlik Ányos-díj	142
Kereszturi Ákos: MARS – fehér könyv a vörös bolygóról		Horváth Péter, 1947–2012 (<i>Bakonyi Imre</i>)	396
(<i>Füstöss László</i>)	136	Huszonöt éves a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete (<i>Lájer</i>	
Meteor Csillagászati Évkönyv, 2013 (<i>Füstöss László</i>)	137	<i>Márton</i>)	325
Roger Penrose: Az idő ciklusai (<i>Neuman Péter</i>)	68	Kalifornia jelentősen megemeli a felsőoktatás támogatását . . .	71
Természet Világa: a mi világunk (<i>Bencze Gyula</i>)	277	Kiválóak összefogása az Európai Tudományos Térség	
PÁLYÁZATOK		fejlődéséért	178
ELMŰ-ÉMÁSZ Energia Suli Program iskolaújság támogató		Kutató tanárok akadémiai elismerése	36
pályázata	35	Magyar Fizikus Vándorgyűlés – Debrecen, 2013. augusztus	
HÍREK – ESEMÉNYEK		21–24. – meghirdetés	177, 213
120 éve született Lánosz Kornél (<i>Schmidt Gábor, Varga</i>		Magyarországon először az MTA Wigner Kutatóközpontban	
<i>János</i>)	139	állítottak elő extrém rövid fényfelvillanást	215
56. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató – felhívás	72	Marx-emlékelőadás 2013 (<i>Patkós András</i>)	289
A 2012. évi Rátz Tanár Úr Életműdíj	36	Megvalósítani John Wheeler álmát: általános relativitáselmélet	
A 2013-as Fizikai Nobel-díjhoz vezető ötven év (<i>Horváth</i>		az egyetemi alapképzésben	177
<i>Dezső</i>)	394	Mekkora a foton élettartama?	324
A fizika törvényeinek látszólag ellentmondó viselkedésű		Mérföldkőnek minősítette az IEEE a holográfia felfedezését	
anyagot fedeztek fel	292	(<i>Csurgayné Ildikó</i>)	324
A közeli infravörösben és a látható tartományban hangolható		MTA Posztdoktori Kutatói Program 2013	178
áteresztőképességű nanokristály-üvegek	364	Műszaki hiba veszélyezteti a Kepler Űrteleszkóp munkáját . .	216
A sötét energia a Higgs-bozon következménye lehet	364	Nagy Imre, 1931–2012 (<i>Bakonyi Imre</i>)	279
A teljes égboltot figyelni majd a hazai fejlesztésű		Nanorészecske-ötvözetek egy új módszerrel felhasználhatók	
kamerarendszer	143	a hő fókuszálására	72
A visszavont cikkek kétharmadánál csalás vagy plágium		Olaszország ejti az egymilliárd eurós SzuperB gyorsító tervét .	72
gyanítható	180	Öveges Tanár Úr utódai sztárokkal	400
A Wigner FK RMI részvételével készülő műszerek is		PhD-fokozatok nyomában: fókuszban a minőség és	
felkerülnek az Európai Űrgyűlés első nagy		a perspektivikus pályáiv	290
bolygóközi űrszondája fedélzetére	179	Rendhagyó fizikaórák a szegedi Agórában	180
A Wigner FK RMI-ben készült műszer a Nemzetközi		Széchenyi-díj	177
Űrállomáson	143	Szeidl Béla, 1938–2013 (<i>Jurcsik Jobanna</i>)	362
Analemma fényképen	36	Szupergyors adatátvitel a CERN genfi és budapesti telephelyei	
Az első, négy kvarkot tartalmazó részecske létezését		között	215
megerősítették	291	Tar Domokos, 1932–2013 (<i>Füstöss László</i>)	280
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2013. évi		Tóth Ferenc, 1932–2013 (<i>Bakonyi Imre</i>)	431
Küldöttközgyűlése (<i>Kürti Jenő</i>)	285	Török, hajlik, felbomlik – kísérletezz a fényvel a szegedi	
Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2013. évi		Agórában!	364
Küldöttközgyűlése – meghirdetés	105	Tudománytörténeti jelentőségű hely az MTA Atomki	
		főépülete (<i>Fenyvesi András</i>)	433
		Tudósok kutatják a terrorista szövegeket a „Dark Web”-en . . .	216
		KÜLÖNSZÁM	
		<i>Szabados László</i> : Van új a Föld felett	

EURÓPAI ÉRDEKESSÉGEK A *EUROPHYSICS NEWS* VÁLOGATÁSÁBAN (2013. július–augusztus)

Harmadfajú alagúthatás

S. A. Gardiner, H. Gies, J. Jaeckel, C. J. Wallace: Tunneling of the 3rd kind: A test of the effective nonlocality of quantum field theory. *Europhysics Letters* 101 (2013) 61001.

A kvantumtérelméletek általános tulajdonsága, hogy a kvantumingadozásokra történő átlagolás eredményeként egy nem-lokális effektív elméletre jutunk. Ezt a tulajdonságot jól lehet demonstrálni egy rezonáns üregbeli kvantumelektrodinamikai elrende-



A bejövő a atom kibocsát egy virtuális fotont (c) és a b gerjesztett állapotba kerül. A világoskék gáton áthaladva rekombinálódnak az eredeti állapotba. A két oldalon elhelyezett tükrök az optikai üreget reprezentálják, amelyek felerősítik az atom és az elektromágneses tér közötti csatolást. A fekete oszlopok olyan potenciálgátakat jeleznek, amelyek az atomot mindkét állapotban az üreg belsejébe zárják, megakadályozva érintkezésüket a tükrökkel.

zéssel. Az *ábrán* bemutatott javaslat szerint a nem-lokálitást annak véges valószínűsége illusztrálja, hogy az atom tetszőleges magasságú potenciálgáton áthaladjon. Az a atom ugyanis „felhasadhat” egy magas gerjesztett virtuális b állapotba és egy c virtuális fotonba, amely nem hat kölcsön a gáttal. A magas gerjesztettség miatt az atom is átlépi a gátat, majd a túloldalon rekombinálódnak az eredeti atomi alapállapottá. Ez az úgynevezett „harmadfajú” alagúthatás lényegesen különbözik az eredeti kvantum-alagutazástól (ezt hívják „elsőfajúnak”). Ez ugyanis a kvantumtérelmélet lényegéhez tartozó soktest-kölcsönhatáson alapul, amely hiányzik a nem-relativisztikus kvantummechanikából. Tisztán kvantumtérelméleti hatásról van szó.

Túl e gondolatkísérlet koncepcionális újdonságán, nagyon izgalmas új kísérleteket indukálhat a kvantumoptikában és a hideg atomok fizikájában. Demonstrálhatja a „falon átvilágító fény” (*shining-through-walls*) típusú kísérleteket, amely hasonló hatások révén (valódi részecskék egymásba alakulá-

sa – „másodfajú alagúthatás”) kutatja a Standard Modelen túli elemi részecskék létezését.

A szélturbinák láthatatlan repedéseinek kimutatása

P. Rinn, H. Heisselmann, M. Wächter, J. Peinke: Stochastic method for in-situ damage analysis. *European Physical Journal B* 86 (2013) 3.

Új módszert dolgoztak ki a szélturbinák alkatrészei szerkezeti viselkedésének turbulens közegbeli valós-idejű követésére. A módszer a mechanikai szerkezetek rugalmas tulajdonságainak – turbulenciák által okozott – ingadozásaira irányul. A szélenergia árában ugyanis jelentős hányadot okoz a szélturbinák meghibásodása, amelyeket a turbulens légáramlatok hatására bekövetkező mechanikai meggyengülésük miatt kell cserélni. A feladat az volt, hogy a turbinák alkatrészei kifáradásának észlelésére az alkatrészek kiszerelese nélküli, az üzemi működés közben elvégezhető eljárást dolgozzanak ki.

Mindmáig az egyes alkatrészek különböző frekvenciájú gerjesztésekre adott válaszát elemző eljárás a legelfogadottabb, amelyet a spektrálanalízis módszerére alapoznak. Azonban turbulens közegben a válaszok torzulnak, és az eddigi elemzések csak a valóban jelentős károsodások kimutatására adtak lehetőséget.



A szélturbinákat nem is gyanított okok gyengíthetik.

A szerzők által kidolgozott analitikus eljárás lehetőséget ad a részegységek mechanikai tulajdonságaiból származó dinamika (mint elsősorban a turbinalapát merevsége) megkülönböztetésére a vele interferáló zajtól, amit elsősorban a változó mértékű turbulencia okoz. A mechanikai rezgések elemzése alapján sikeresen követték a turbina anyaga mechanikai tulajdonságaiban bekövetkező változásokat.

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keressd a fizikaismle.hu mellékletek menüpontjában!

Nézzed meg!
Töltsd le!

Mutasd meg másoknak!
Tanítsd meg diákjaidnak!



Gyere el a múzeumba!

A kiállítás
korhatár nélkül,
fényképes
igazolvánnyal
ingyenesen
látogatható.

Nyitva tartás:
hétfő-péntek: 8.00-15.00
szombat: 9.00-13.00
vasárnap: ZÁRVA

Érdeklődni lehet: 75/50-74-32

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.
7031 Paks, Pf. 71. hrsz. 8803/15
telefon és fax: 06-75-505-000; 1/355-1332
weboldal: www.atomeromu.hu
Facebook profil:
www.facebook.com/paksiatomeromu



Atomenergetikai Múzeum



mvm paksi atomerőmű

