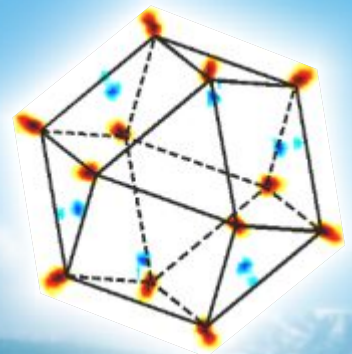
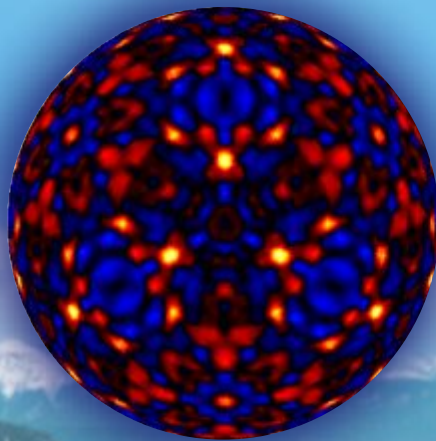


fizikai szemle



2004/11

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

Főszerkesztő:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Hock Gábor

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A lap e-postacíme:

fizszem.elft@mtesz.hu

A folyóiratba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A címlapon:

**A grenoble-i Európai Szinkrotronsugár-
forrás (ESRF), a magyar együttműködés
színhelye. NiO-on végzett
röntgen-holográfiai mérés képe és
a Ni- és O-atomok térbeli elhelyezkedése
(Faigel Gy. és mtsai – fenti inzert).**

TARTALOM

<i>Berényi Dénes:</i> Ismét a szinkrotronokról	361
<i>Faigel Gyula:</i> A röntgensugárzás hatása hétköznapiainkra	362
<i>Nagy Dénes Lajos, Botlyán László, Deák László, Major Márton, Szilágyi Edit, Tanczikó Ferenc:</i> Domének keletkezése és átalakulásai antiferrómágnesesen csatolt multirétegekben	368
<i>Deák László, Botlyán László, Major Márton:</i> Vékonyrétegek szinkrotron-Mössbauer-reflektometriai vizsgálata stroboszkópos detektálással	372
<i>Török Szabina, Osán János:</i> Másodlagos aeroszolkok nitrogénkomponenseinek mérése nagy időfelbontással	375
<i>Garab Győző:</i> Nemkettősréteg-lipidek kettősréteg-szerkezetű membránokban	377
<i>Odry Péter:</i> Digitális jelfeldolgozás alkalmazása a fizikában	381
MEGEMLEKEZÉSEK	
<i>Dombi József:</i> Emlékezés Budó professzorra, aki Szegeden a háború után a fizikát új életre keltette	387
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Vannay László, Fülöp Ferenc, Máthé József, Nagy Tamás, Vankó Péter:</i> A fizika Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny harmadik fordulója a harmadik kategória részére – 2004	390
HÍREK – ESEMÉNYEK	
A 2004. évi Bolyai-díjas: Bor Zsolt akadémikus (<i>Roska Tamás</i>)	393
Bor Zsolt beszéde a díj átvételekor	394
Tudományos ülés Kroó Norbert akadémikus, az MTA főtitkára 70. születésnapja tiszteletére	396
A Magyar Szinkrotron Bizottságról (<i>Nagy Dénes Lajos</i>)	396
KÖNYVESPOLC	396
<i>D. Berényi:</i> Once again – synchrotron papers in our journal	
<i>G. Faigel:</i> X-rays in our everyday life	
<i>D.L. Nagy, L. Botlyán, L. Deák, M. Major, E. Szilágyi, F. Tanczikó:</i> Formation and transformation of domains in anti-ferromagnetically-coupled multilayers	
<i>L. Deák, L. Botlyán, M. Major:</i> The investigation of thin layers using synchrotron-Mössbauer-spectroscopic methods and stroboscopic detection	
<i>S. Török, J. Osán:</i> High temporal resolution measurement of nitrogen components in secondary aerosols	
<i>G. Garab:</i> Non-bilayer lipids in bilayer membranes	
<i>P. Odry:</i> The use of digital signal processing in physics	
COMMEMORATIONS	
<i>J. Dombi:</i> Remembering Professor A. Budó, who achieved the revival of physics at Szeged University after World War II	
TEACHING PHYSICS	
<i>L. Vannay, F. Fülöp, J. Máthé, T. Nagy, P. Vankó:</i> The third round of the Hungarian Secondary Schools' 2004 Physics Competition	
EVENTS	
The 2004 Bolyai Award granted to academician Zsolt Bor (<i>T. Roska</i>)	
Z. Bor's answering address	
Scientific session, honoring 70-years-old Norbert Kroó, General Secretary of the Hungarian Academy of Sciences	
The Hungarian Synchrotron Committee (<i>D.L. Nagy</i>)	
BOOKS	
<i>D. Berényi:</i> Wiederum Synchrotron-Artikel in unserer Zeitschrift	
<i>G. Faigel:</i> Röntgenstrahlungen in unserem Alltagsleben	
<i>D.L. Nagy, L. Botlyán, L. Deák, M. Major, E. Szilágyi, F. Tanczikó:</i> Entstehung und Umwandlungen von Domänen in anti-ferromagnetisch gekoppelten Vielschicht-Strukturen	
<i>L. Deák, L. Botlyán, M. Major:</i> Untersuchungen an dünnen Schichten unter Anwendung synchrotron-Mössbauer-reflektometrischer Methoden und stroboskopischer Beobachtung	
<i>S. Török, J. Osán:</i> Zeitlich hochauflösende Bestimmung von Stickstoff-Komponenten in sekundären Aerosolen	
<i>G. Garab:</i> Nicht-doppelschichten-lipide in Membranen mit Doppelschicht-Struktur	
<i>P. Odry:</i> Anwendungen der digitalen Signalverarbeitung in der Physik	
ZUR ERINNERUNG	
<i>J. Dombi:</i> Zum Andenken von Professor A. Budó, der an der Universität von Szeged der Physik zu einer neuen Blüte verhalf	
PHYSIKUNTERRICHT	
<i>L. Vannay, F. Fülöp, J. Máthé, T. Nagy, P. Vankó:</i> Die dritte Runde des Physik-Wettbewerbs ungarischer Mittelschulen 2004	
EREIGNISSE	
Bolyai-Preis 2004, verliehen an Akademie-Mitglied Zsolt Bor (<i>T. Roska</i>)	
Z. Bors Antrittsrede	
Wissenschaftliche Sitzung zu Ehren des 70-jährigen Generalsekretärs der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Norbert Kroó	
Die Ungarische Synchrotron-Kommission (<i>D.L. Nagy</i>)	
BÜCHER	
<i>Д. Берени:</i> Заново – статьи о синхротронах в нашем журнале	
<i>Д. Файгель:</i> Рентгеновские лучи в быту и в приборах измерительного дела	
<i>Д.Л. Надь, Л. Ботьян, Л. Деак, М. Майор, Э. Силеди, Ф. Танцико:</i> Возникновение и изменения доменов в многослойных структурах с анти-ферромагнитной связью	
<i>Л. Деак, Л. Ботьян, М. Майор:</i> Синхротрон-Мэссбауер-рефлектометрические исследования тонких пленок методом стробоскопического детектирования	
<i>С. Тэрэк, Я. Ошан:</i> Измерение азотных компонентов во вторичных аэрозолях	
<i>Г. Гараб:</i> Не-двойное состояние липиды в мембранах с двойное состоянием структуры	
<i>П. Одри:</i> Применение цифровых методов обработки сигналов в физике	
НА ПАМЯТЬ	
<i>Й. Домби:</i> На память о профессором А. Будо, способствовавшем послевоенному воскресению физики на университете г. Сегед	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>Л. Ваннай, Ф. Фюлэп, Й. Матэ, Т. Надь, П. Ванко:</i> Третий раунд (для особо одаренных) Конкурса венгерских средних школ по физике 2004г	
ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ	
Награждение академика Ж. Бора премией Бояи (<i>Т. Рощка</i>)	
Ответное выступление Ж. Бора	
Научная сессия в честь 70-летнего главного секретаря Венгерской Академии Наук Н. Кроо	
О Венгерской Комиссии по Синхротронам (<i>Д.Л. Надь</i>)	
КНИГИ	

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LIV. évfolyam

11. szám

2004. november

ISMÉT A SZINKROTRONOKRÓL

Berényi Dénes
ATOMKI, Debrecen

A *Fizikai Szemlé*ben nem először írunk a szinkrotronokról, amelyekről a közvélemény – legalábbis a laikus közönség, mivel nagy gyorsítókról van szó – rögtön az atommagfizikára, részecskefizikára gondol, „hiszen ilyen nagyberendezésekre csak ott lehet szükség”.

Hogy mennyire nem így van, arra legjobb példa éppen a szinkrotron, ez a valóban nagyenergiájú elektrongyorsító, amely – pontosabban a felhasználásával létrehozott szinkrotronsugárzás – elsősorban a szilárdtestfizikában, a kémiában és a biológiában, de a környezet- és az orvostudományban is, valamint a geológiában kerül alkalmazásra, sőt a kifejezett ipari gyakorlatban is.

A Fizikai Szemle már egy különszámban foglalkozott korábban a szinkrotronsugárzás alkalmazásaival, legalábbis azok egy csoportjával (Fizikai Szemle 48/3 [1998]), de már ezt megelőzően is jelent meg a Fizikai Szemlében a szinkrotronsugárzással foglalkozó cikk (Fizikai Szemle 44 [1994] 285–289). Éppen ezért a szinkrotronok és a szinkrotronsugárzás még csak rövid ismertetésébe sem mehetünk itt bele. Annyit azért érdemes hangsúlyozni, hogy a széles körű alkalmazást az tette lehetővé, hogy a szinkrotronok teljesen új távlatot és lehetőséget nyitottak meg a röntgensugárzás alkalmazásaiban. A szinkrotronok ugyanis mindenekelőtt a korábbi sugárforrásokhoz viszonyítva (különösen az undulátorok és wigglerek közbeiktatásával) sok nagyságrenddel intenzívebb röntgensugárnyalábot tudnak szolgáltatni, amelynek további speciális tulajdonságai vannak: széles spektrális eloszlású, koherens, jól kollimált és a térben erősen koncentrált, továbbá polarizált és jól kihasználható időstruktúrája van.

Ma a világon több mint félszáz szinkrotron működik (és számos van építés alatt), köztük viszonylag kis, könnyen kezelhető, kifejezetten ipari célokra épült berendezések és hatalmas, több GeV energiára gyorsított elektronokkal működő, többször tíz mérőcsatornával rendelkező nemzetközi együttműködésben kihasznált szinkrotronok. Ezek közül – már csak a magyar kutatók érdekeltsége miatt is – érdemes megemlíteni például az Elettrát (Trieszt), a Petrát és a továbbfejlesztett Dorrist (Hamburg), a Max-II-t (Lund). Bár ezek „nemzeti” berendezések, de mindegyik csatornán számos külföldi kutatócsoport is dolgozik. Említsük itt meg, hogy magyar kuta-

tók együttműködés keretében amerikai szinkrotronsugárforrást is felhasználtak kutatásaikban.

A grenoble-i ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) 6 GeV elektronenergiával már nemzetközi vállalkozás. Hazánk 2000 óta hivatalosan is kapcsolódik ehhez az együttműködéshez, a folyó költségek 0,2%-át fizeti, és ennek megfelelő a magyar kutatók nyalábfelhasználása is, de már látható, hogy az érdeklődés növekedése miatt ez a közel jövőben emelkedni fog. Egyébként szó van róla, hogy Csehországgal, Lengyelországgal és Szlovákiával konzorciumot alkotva úgynevezett „associate” státust nyerünk el, ami azt jelenti, hogy ezek után nemcsak használhatjuk a nyalábcsoportokat ennek keretében, de bizonyos, az ESRF-fel kapcsolatos döntésekben is részt vehetünk.

A magyar kutatók érdeklődése különösebben már a múlt század nyolcvanas évében fordult a szinkrotron, illetve a szinkrotronsugárzás alkalmazásai felé. 1992-ben a Magyar Tudományos Akadémia és az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság közös bizottságaként megalakult a ma is működő Magyar Szinkrotron Bizottság, amely szerény anyagi lehetőségei ellenére igyekezett elősegíteni a szinkrotron-, illetve a megfelelő sugárnyalábok alkalmazását a magyar tudományos kutatásban. A bizottság tudományos összejeveleteket – köztük nemzetközietek – rendezett, kisebb kiadványokat jelentetett meg (pl. *Magyar kutatócsoportok tapasztalatai szinkrotronsugárforrásoknál*). A 90-es években tulajdonképpen a bizottság minden ülését egy-egy „célzott” szimpóziumnak lehetett tekinteni, amelynek keretében a szinkrotronok, illetve a szinkrotronsugárzás alkalmazásával kapcsolatos konkrét kérdések, eredmények kerültek megvitatásra. Emellett szerény méretekben ténylegesen is tudott pénzügyileg támogatni konkrét kutatásokat szinkrotronok mérőcsatornáin (pl. kiutazási költségek).

Ma már el lehet mondani, hogy a fenti törekvések eredményeképpen nemcsak „virágba szökkentek” a szinkrotronsugárzás alkalmazásai a magyar kutatók munkájában, de „termőre fordultak” ezeknek az erőfeszítéseknek eredményei. Számos magyar kutatócsoport a különböző tudományterületekről dolgozik és ér el jelentős eredményeket szinkrotronok mellett. Erre láthatunk példákat a Fizikai Szemle jelen számában.

A RÖNTGENSUGÁRZÁS HATÁSA HÉTKÖZNAPJAINKRA

Faigel Gyula

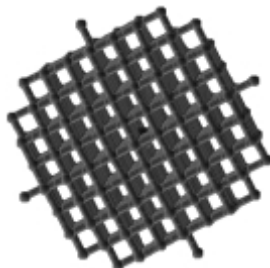
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet

Mindenki volt már tüdőszűrésen, és azt is jól tudjuk, hogy ha lábunkat eltörjük, akkor a csontok összeillesztéséhez röntgenfelvételt készít az orvos. Arról azonban, hogy az orvostudományon kívül mire használják a röntgensugárakat, már sokkal kevesebbet hallottunk. Pedig mindennapi életünk során használt eszközök közül nagyon sok nem létezne röntgensugárzás híján. Ilyen az elektronikus eszközök nagy része, például tv, számítógép, a gépjárművekben lévő számos alkatrész, a repülőgépek úrhajók alkotóelemeinek jó része, gyógyszereink közül igen sok, és még hosszan sorolhatnánk tovább. Mi az oka a röntgensugárzás ily széles körű alkalmazásának? Az, hogy a felsorolt eszközökben, alkatrészekben felhasznált anyagok bizonyos tulajdonságait igen pontosan be kell állítani és egyenletes szinten tartani a megfelelő működőképesség eléréséhez. Ugyanakkor ezen tulajdonságokat az alkotó atomok milyensége és térbeli elrendeződése döntően meghatározza. Mindkettő vizsgálatára szolgáló legjobb módszerek a röntgensugárzáson alapulnak. Nemrég volt a röntgensugárzás felfedezésének századik évfordulója. Ez alatt a 100 év alatt a röntgensugárzásra alapozott technikák sokasodtak és tökéletesedtek. Az egyes módszerek háttérét komoly tudományos felfedezések adják. Ezek színvonalát talán legjobban jellemzi a röntgensugárzás témában odaítélt Nobel-díjak nagy száma. A következőkben ezeket tekintjük át röviden. A hozzájuk fűzött magyarázatok egyben jelzik a tudományos kutatásban lehetséges alkalmazásokat, és bevezetik azokat a fogalmakat, melyeket a későbbi fejezetekben használunk.

1901 – *W.C. Röntgen*: a róla elnevezett sugárzás felfedezéséért. Az ismeretlen sugárzás egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy fény számára átláthatatlan anyagokon is áthatol.

1914 – *M.T.F. von Laue*: a röntgensugár kristályokon létrejövő diffrakciójának felfedezéséért. Laue kísérletben igazolta az anyag atomjainak kristályrácsba való rendeződését és azt, hogy a röntgensugárzás elektromágneses hullám természetű (tehát a fényvel rokon, csak sokkal nagyobb frekvenciájú, azaz sokkal rövidebb hullámhosszú).

1. ábra. Példa atomok kristályrácsba történő rendeződésére. Az atomok a kockák csúcaiban helyezkednek el. Csak 8 kockát (ún. elemi cellát) mutatunk. A valóságban egy porszemnyi kristályban is nagyon sok (sok milliárd) ilyen kocka van szoros sorban elhelyezkedve. Megjegyezzük, hogy ez a legegyszerűbb elemi cella, s még nagyon sok, különböző alakú cella létezik a természetben.

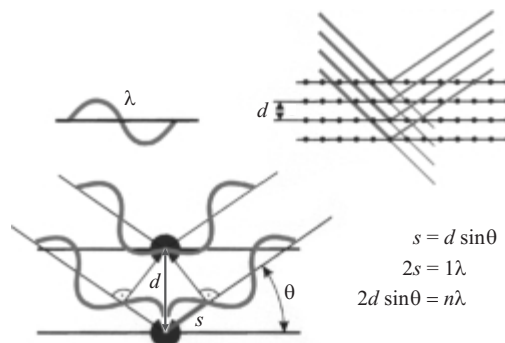


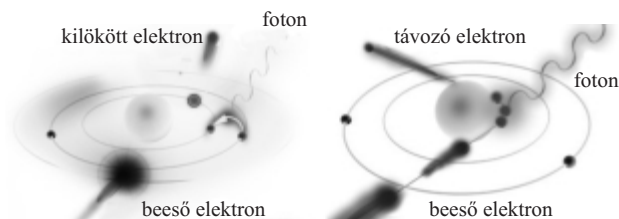
A kristályrácsba való rendeződés azt jelenti, hogy az anyagok egy jelentős részében az atomok nem véletlenszerűen helyezkednek el a térben, hanem olyan sorban, hogy egy atomtól adott irányba és távolságra lépve egy ugyanolyan atomot találunk, és ennek a környezete is azonos az eredeti atoméval. Ezt a „lépegetést” a végtelenségig folytathatjuk. Például képzeljük el kockák szoros egymás mellé pakolását és a kockák csúcaiban elhelyezkedő atomokat (*1. ábra*). A gyakorlatban persze végtelen kristályok nincsenek, de ha tekintetbe vesszük az atomok igen kicsi méretét ($\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$), akkor még egy 1 cm élhosszú kristályban is nagyon sok (10^{24}) ilyen kis „kocka” fér el. Ezt a számítások és elméleti megfontolások során végtelennek tekinthetjük. A fenti tulajdonságot térbeli periodicitásnak nevezzük, és ez a szilárdtestfizika egyik alapköve.

1915 – *Sir W.H. Bragg* és *Sir W.L. Bragg*: a kristályszerkezet röntgensugár-módszerrel történő analizisének felfedezéséért. Egyszerű, szemléletes képet adtak a kristályokon történő diffrakcióra. Ennek alapján lehetővé vált a kristályokról szóródott röntgenfotonok térbeli eloszlásának méréséből következtetni a kristályrács paramétereire. A kép lényege, hogy a szórást úgy képzelhetjük el, mint ha a kristályban tükrök lennének elhelyezve különböző irányokban. Ezeket a tükröző síkokat a rácsba rendezett atomokon áthaladó síkseregek alkotják. Egy-egy síksereg akkor reflektál, ha a párhuzamos síkok közötti távolság a hullámhossz és a beesési szög között az úgynevezett Bragg-összefüggés teljesül ($n\lambda = 2d \sin\theta$; $n = 1, 2, 3, \dots$). Ez szemléletesen azt jelenti, hogy két sík közé éppen egész számú hullám fér (*2. ábra*).

1927 – *A.H. Compton* és *C.T.R. Wilson*: a rugalmatlan röntgensugár-szóródás (Compton-effektus) felfedezéséért. A rugalmatlan szóródás azt jelenti, hogy a beeső fo-

2. ábra. A kristályokban való röntgendiffrakció szemléltetését látjuk. A jobb felső részen az atomokon át fektethető kristálysíkokat mutatjuk. A bal felső ábra a fotont mint hullámot jelképezi, és egy hullámhossznyit rajzoltunk fel. A bal alsó rész pedig azt mutatja, hogy akkor van erős reflexió, ha a hullámhossz éppen belefér a rácssíkok közé.





3. ábra. A röntgenső anódjának anyagában lezajló atomi folyamatok: a jobb oldali ábrán az elektronok atomokon való fékeződését és az ennek során keletkező röntgensugárzást szemléltetjük. A bal oldali ábra egy lehetséges másik atom–elektron kölcsönhatást mutat: az ionizációt, melynek során egy nagy energiával beeső elektron kiűthet egy másik, az atomon erősen kötött elektront. Ekkor az elektron helyén egy hiány, „lyuk” keletkezik és ide mintegy „beesik” egy távoli atomi pályáról egy kevésbé kötött elektron, és a fölös energia egy röntgenfoton formájában távozik.

ton valamennyi energiát átad az anyagban lévő elektronnak (mintegy meglöki azt), és így végeredményben egy kisebb energiájú fotont és egy nagyobb energiájú elektront detektálhatunk. Ez a szórástípus nem hordoz szerkezeti információt, de használható az elektronok sebességeloszlásának meghatározására.

1985 – H.A. Hauptman és J. Karl: a röntgendiffrakcióból történő kristályszerkezet-meghatározó módszer (a direkt módszer) kidolgozásáért. Ez a második Nobel-díj szerkezetmeghatározásért, mutatva e kérdéskör fontosságát. Az 1915-től 1985-ig eltelt 70 évben komoly fejlődésen mentek keresztül a röntgentechnikák. Jóllehet ettől még gyorsabb volt a számítógépek, illetve számítástechnika fejlődése. Ez tette lehetővé, hogy a direkt módszer a gyakorlatban is működhessen. Lényege, hogy a mintáról való minimális előzetes ismeret (pl. összetétel, sűrűség) felhasználásával a röntgenszórás képből az operátor lényeges beavatkozása nélkül (mintegy automatikusan) meghatározhatók nem túl bonyolult kristályszerkezetek.

Milyen alkalmazásokhoz vezettek a fenti kiemelkedő tudományos eredmények? Mielőtt e kérdésre válaszolnánk, röviden ismertetnénk kettőt azok közül az eszközök közül, amelyek röntgensugárzás keltésére alkalmasak. Azért tartjuk fontosnak ezeket, mert nélkülük a fenti felfedezések sem valósulhattak volna meg. Másrészt az olvasó benyomást kap arról, hogy a mai modern nagyberendezések hogyan kapcsolódnak mindennapi életünkhöz.

Sugárforrások

Azt hiszem, nem kíván részletesebb magyarázatot, hogy az anyagról szerezhető információt döntően befolyásolja a mérőnyaláb minősége, vagyis, hogy milyen a sugárforrás. Ha csak arra gondolunk, hogy a szabad szemmel való vizsgálódásnál sem mindegy, hogy milyen megvilágítást használunk, például egy elemlámpát, vagy egy 1 KW-os higanygőz-éget, zöld fényt vagy pirosat, netalán infravöröset vagy ultrabolyt, egy éles keskeny nyalábot vagy egy minden irányban világító éget. A röntgentechnikáknál is nagyban befolyásolja a mérési lehetőségeket milyen sugárforrást használunk. A következőkben erről fogunk írni. Azért is aktuális e téma, mert az utóbbi néhány évtizedben

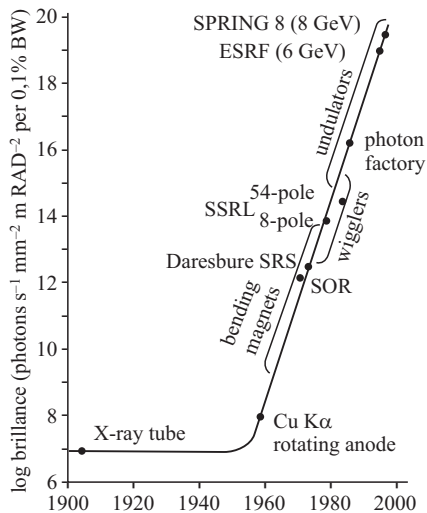


4. ábra. A világ egyik legmodernebb szinkrotronsugár-forrásának a grenoble-i Európai Szinkrotronsugár-forrás (ESRF) távlati képe.

a sugárforrásoknak egy új fajtája a szinkrotronsugár-források jelentek meg, melyek forradalmasították a röntgentechnikákat. Ahhoz, hogy megértsük, miért különlegesekek a szinkrotronsugár-források, először röviden ismertetjük a hagyományos röntgenforrások tulajdonságait, majd összevetjük a szinkrotronsugárzás jellemzőivel.

A hagyományos röntgenforrás egy vákuum alatt lezárt csőből áll, amelyben egy izzószálból elektronok lépnek ki, melyek a katód és anód közé kapcsolt nagyfeszültség hatására felgyorsulnak és becsapódnak az anódra. A becsapódó elektronok hozzájárulnak a röntgensugárzást két folyamat eredményeképpen: 1) az elektronok az atomokon való ütközések során fékeződnek és sugároznak, lásd 3. ábra jobb oldala (az elektrodinamikából ismert, hogy sebességüket változtató töltések sugároznak). 2) A nagyenergiájú beeső elektron kiűthet egy másik az atomon erősen kötött elektront, ekkor az elektron helyén egy hiány, „lyuk” keletkezik és ide mintegy „beesik” egy távoli atompályáról egy kevésbé kötött elektron. Mivel magasabb energiájú állapotból alacsonyabb energiájú állapotba kerül az elektron, az energiamegmaradás törvényének megfelelően egy a különbségenergiával rendelkező fotont bocsát ki az atom, lásd 3. ábra bal oldala.

A szinkrotronsugár-források merőben más felépítésűek. A hagyományos forrásokkal szemben ezek már nem férnek el egy 20 cm-es üvegcsőben, hanem a méterestől a km-es átmérőjű gyűrűk (4. ábra). Ezekben közel körpályán keringenek a fényhez közeli sebességgel az elektronok (vagy pozitronok, az elektronok antirészecskéi). Mivel keringés közben változik a sebességük (pontosan, ennek iránya), sugároznak. Ez az elektromágneses sugárzás a szinkrotronsugárzás. Miért is hívják így? Az elektronok a sugárzással energiát veszítenek, lassulnak. Ezt pótolni kell, ha a sugárzást azonos szinten akarjuk tartani. Ezért a szinkronban minden egyes körülfordulással egyet „lökünk” az elektronokon. E miatt a szinkronban való energiavisszapumpálás miatt nevezzük ezeket a gyűrűket szinkrotron-tárológyűrűknek. Hasonlítsuk össze a hagyományos és a szinkrotronforrásokból származó sugárzás tulajdonságait. A legszembetűnőbb az eltérés a fényességben. Ez arra jel-



5. ábra. A röntgensugár-források fényességének az évek folyamán való növekedését láthatjuk. Az ötvenes évekig nincs nagy változás, ekkor jelentek meg a szinkrotronsugár-források. Ezután rohamos növekedés vette kezdetét, ami még napjainkban is tart.

lemző, hogy milyen kis forrásból hány foton jön ki másodpercenként, és mennyire párhuzamosan egy megadott energiatartományban. A legtöbb fizikai méréshez a minél nagyobb fényesség a jobb. A sugárforrások fényességének változását mutatja az idő függvényében az 5. ábra. Jól látható, hogy a szinkrotronforrások megjelenésével erőteljes növekedés mutatkozik. Napjaink legjobb forrásai 10 nagyságrenddel (tehát 10 milliárdszorosan) is felülműlják a hagyományos társaikat. Ez új méréstípusok kialakulására és a régiek nagyarányú fejlesztésére ad lehetőséget. A fényességen kívül nézzünk még néhány fontos paramétert:

1. **Energiaspektrum.** Ez azt mondja meg, hogy különböző energiákon hány fotont szolgáltat a forrás. A hagyományos forrásoknál egy gyenge folytonos háttéren néhány adott energiájú erős keskeny vonalat látunk (6. ábra, jobb oldali grafikon). A folytonos részt a gyakorlatban nagyon ritkán használjuk, mert itt kevés a foton. Tehát méréseinket csak meghatározott energián tudjuk végezni. A szinkrotronoknál a kijövő sugárzás spektruma attól függ, hogy a gyűrű milyen részéből vesszük a mintát. A hajlító mágneseknél (amelyek az elektronokat körpályán tartják) (6. ábra, bal alsó 1. kép) és a nagy amplitúdójú, periodikus eltérítő egységeknél (*wiggler*) (6. ábra, bal alsó 2. kép) közel folytonos energiaspektrumot mérünk (6. ábra, bal felső grafikon). A kis amplitúdójú, periodikus eltérítő egységeknél (*undulator*) (6. ábra, bal alsó 3. kép) csúcsos spektrumot kapunk, de a csúcs helye változtatható. Tehát szinkrotronoknál nem vagyunk egy-egy meghatározott

energiához kötve, hanem a mérés kívánalmainak legjobban megfelelő sugárzást használhatunk.

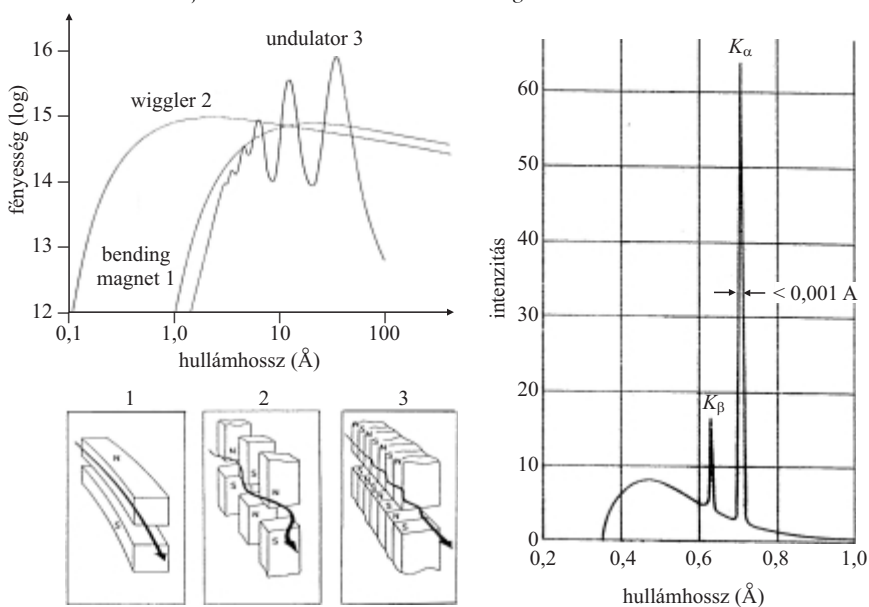
Még egy tulajdonságot emelünk ki: az *időbeli lefolyást*. Hagyományos forrásoknál a fotonok időben véletlenszerűen, folytonosan jönnek. Szinkrotronoknál egymástól időben távol elhelyezkedő (100 ns), rövid (1 ns) erős impulzusok formájában érkeznek a sugárzás.

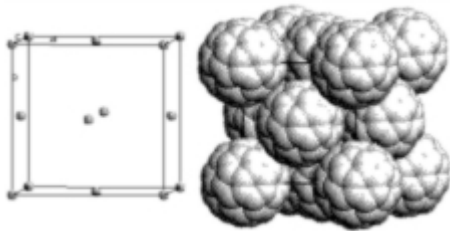
A szinkrotronsugárzás fenti tulajdonságai kombinálva a nagy fényességgel, az anyag szerkezetének és egyéb jellemzőinek mélyebb megismerését teszi lehetővé, és a gyakorlati alkalmazások körét is nagymértékben bővíti.

Mielőtt lezárnánk ezt a témát, néhány szó arról, hogy mennyibe kerül mindez az „adófizetőnek”. Egy hagyományos röntgenforrás tipikusan a 10 millió Ft-os kategóriába esik. Egy szinkrotronsugár-forrás körülbelül 100 millió dollárba (~20 milliárd Ft) kerül. Ez utóbbi soknak tűnik, de ha egy foton „árát” nézzük akkor a szinkrotronnal sokkal olcsóbban állíthatunk elő egyet.

Körülbelül 10 milliószor kevesebbe kerül egy szinkrotronnal előállított röntgenfoton, mint egy hagyományos röntgenforrásból nyert foton. Ha ehhez még hozzátesszük, hogy a szinkrotron mérőnyaláb (tehát a fotonok) minősége is sokkal jobb, mint hagyományos források esetén, világossá válik, hogy a szinkrotronok a jövő sugárforrásai. Megjegyezzük, hogy Magyarországnak sajnos nincsen szinkrotronsugár-forrása. Az eszközökben való ilyen elmaradottság majdnem egyenesen vonja maga után a kutatásban, illetve a magas technológiát kívánó iparágakban való elmaradást is. Ezt valamelyest kompenzálhatjuk, ha tagjai vagyunk nemzetközi együttműködéseknek, ahol szinkrotronforrásokat üzemeltetnek. Sajnos több évtizeden át ez nem valósult meg, azonban 2001-ben az MTA és az OMFB együttes támogatásával társult tagja lettünk az Európai Szinkrotron Laboratóriumnak (Grenoble, Franciaország). A többi szinkrotronhoz a ma-

6. ábra. Az ábrán a különböző röntgensugár-források által kibocsátott sugárzás hullámhossz szerinti eloszlását mutatjuk. Részletesebb leírást lásd a szövegben.





7. *ábra.* A legismertebb fullerén-molekula, a C_{60} kristályrácsát (baloldalt) és az ebben elhelyezett molekulákat (jobboldalt) láthatjuk.

gyar kutatók továbbra is egyéni kapcsolatokra építve próbálnak eljutni és így lépést tartani a világszínvonallal.

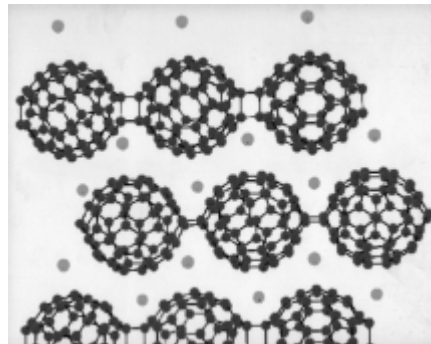
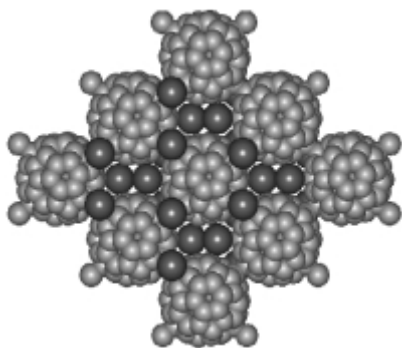
A következőkben – a teljesség igénye nélkül – a szinkrotronsugárzás alkalmazásaira mutatunk példákat. Ezek között olyat is említünk, amely hazai kutatók munkája.

Tudományos alkalmazások

A felsorolt példák a napjainkban folyó kutatások élvonalaiból származnak. A kutatás természetes velejárója, hogy előrébb tart, mint az ipari, illetve más gyakorlati felhasználások. Ezért a felsorolt eredményeket általában még nem alkalmazzák széles körben. Azonban az egyes felfedezések ismertetése után röviden utalunk arra, hogy milyen alkalmazások várhatók, vagy korábbi hasonló kutatások milyen „megfogható” eredményre vezetnek.

A szilárdtestfizika, illetve kémia területén az évtized egyik legérdekesebb felfedezése a fullerén-molekulák és az ezekből készíthető anyagok voltak. Ezt tükrözi a 1997-es Nobel-díj. E molekulák a kémia új ágát indították útjára.

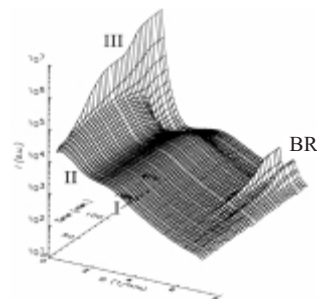
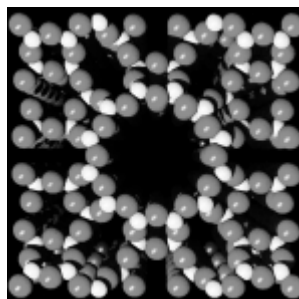
A fullerén-molekulák szénatomok alkotta zárt, héjszerű molekulák. Legismertebb közülük a hatvan szénatomot tartalmazó C_{60} (7. *ábra*), de e családban több szénatomból álló tagokat is találunk, mint a C_{70} , C_{82} stb. Most a C_{60} alkálifémekkel alkotott sói közül jellemzünk néhányat. Mi e sók érdekessége? Az összetételtől és előéletől függően nagyon változatos tulajdonságúak. Találhatók közöttük szigetelő fémek, sőt szupravezetők is. Ezen anyagok többségében a molekulákat gyenge Van der Waals- vagy ionos kötések kapcsolják egymáshoz (pl. A_3C_{60} , A_6C_{60} stb. $A = K, Rb, Cs$). Csoportunk az A_4C_{60} ösz-



8. *ábra.* Az A_4C_{60} típusú ($A = K, Rb, Cs$) egydimenziós polimer molekuláris szerkezete. Jól láthatók a C_{60} molekulákból alkotott láncok és a közöttük elhelyezkedő alkáli atomok.

szetételű anyagok szerkezetének felderítését tűzte ki célul. Azt találtuk, hogy ezek stabil fázisa merőben eltér a többi vegyületétől, mert ezekben erős kovalens kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz a fullerén-molekulák. A 8. *ábrán* láthatjuk a szerkezet vázát és a kialakult kötéskonfigurációt. A molekulák négyes gyűrűket alkotó kötések sorozatával kapcsolódnak, és így hosszú láncokat alakítanak ki. Ezek a láncok kristályrácsba rendeződnek. Az ilyen anyagokat egydimenziós kristályos polimereknek nevezzük. Előfordulásuk a természetben még más anyagcsaládok körében sem gyakori. A szerkezetmeghatározás különlegessége, hogy úgynevezett pordiffrakcióból történt. Ez azt jelenti, hogy nem egy kis egykristályt tettünk a mérőnyalámba (mivel ilyen nem lehetett előállítani), hanem nagyon sok apró porszemcsét, minden irányban azonos valószínűséggel álló kristallitok sokaságát. Ebben az esetben a reflexiók iránybeli információja elvesz, s ezért a szerkezet meghatározása nehéz. A pontos atomi rendet csak igen jó minőségű porspektrumból (azaz, nagy részletességgel megmért intenzitáseloszlásból) kaphatjuk meg. Ilyen adatsorok felvétele csak szinkrotronsugárzás segítségével lehetséges. Tovább vizsgáltuk ezt az anyagcsaládot, mivel elméleti megfontolásaink azt jelezték, hogy léteznie kell magasabb dimenziójú polimereknek is. Tehát olyanoknak, amelyekben nemcsak egyes láncokba kapcsolódnak a C_{60} -molekulák, hanem síkokba vagy a tér minden irányába. Végül sikerült szintetizálnunk Na_4C_{60} összetétellel egy olyan anyagot, amelyben kovalens C_{60} síkok alakultak ki, tehát egy kétdimenziós polimer. Ezt a szerkezetet a 9. *ábra* mutatja.

10. *ábra.* A bal oldalon egy zeolit atomi szerkezetét látjuk. A világos golyók az oxigént, míg a sötétebbek a Si-ot ábrázolják. A jobb oldalon a röntgendiffrakciós kép időbeli változását mutatja.



A fullerének gyakorlati alkalmazása még nem jellemző, hiszen még nagyon „új” anyagok. Azonban vannak elképzelések kenőanyagként, igen finom szűrőként, képernyőkben világító elemként vagy orvosságokban és még sok más helyen történő felhasználásra.

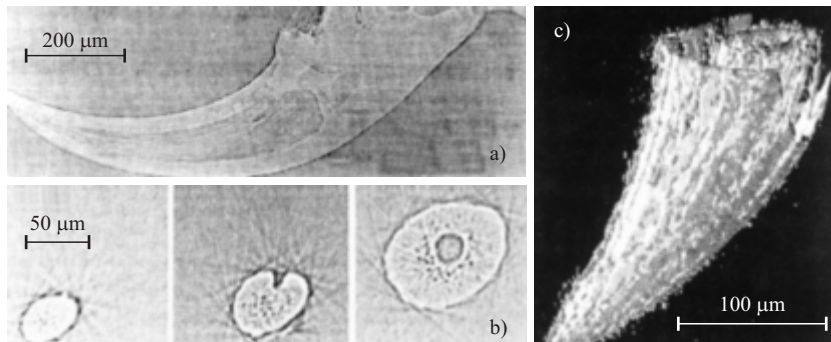
A következőkben a kémia területéről mutatok példát. Szintézis során az anyagok minősítésének tipikus módja a kezdő és végtermékek milyenségének (tehát szerkezet, összetétel) meghatározása. Sok esetben azonban jó lenne tudni egy folyamat közbeni állapotokat, hiszen ez lehetővé tenné a végtermék tulajdonságának finomhangolását. Ezt gyakran úgy próbálják elérni, hogy egy-egy pontban „megállítják” a reakciót, és a termékeket vizsgálják. Ilyen esetben nem triviális, hogy ugyanazokat a paramétereket mérjük, mint amilyenek a valódi szintézis körülményei között vannak, hiszen megbontottuk a rendszer egyensúlyát. Ezt kiküszöbölhetjük, ha képesek vagyunk a reakció közben, annak zavarása nélkül minősíteni az anyagot. Ilyen példát mutat a 10. ábra. Itt a széles körben használt zeolitok kialakulását követték az idő függvényében, egyszerre több módszerrel is alkalmazva, az ultrakisszögű szórástól a nagyszögű diffrakcióig. Kiderült, hogy a reakció alapvetően két lépésből áll. Az első során az úgynevezett elsődleges egységek (~2,8 nm) és ezek aggregátumai (~10 nm), a másodikban pedig nukleáció, majd a makroszkopikus kristályos anyag alakul ki. Ezen reakció időskálájának pontos ismerete elősegítheti, hogy olyan formában, tulajdonságokkal állítsuk elő a zeolitokat, amilyenben szükségünk van rá.

A zeolitokat legtöbbször katalizátorként alkalmazzák. Tehát vegyi üzemekben, amelyek termékeit gyakran használjuk mindennapi életünk során. Katalizátorok vannak az autók kipufogójában is, hogy ne szennyezzék a levegőt.

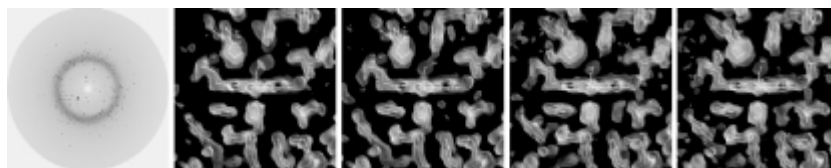
A kémia után lássunk két példát a szinkrotronsugárzásnak biológiai kutatások területén való felhasználásra.

Először a mikrotomografikus leképzési technikák alkalmazására mutatunk példát. A 11. ábrán egy pók csápjának fáziskontraszt-képét láthatjuk. 500 különböző szögből készült felvételtől a csáp 3D képét is megkaphatjuk. Ezt mutatja az 11. ábra jobb oldala. A balra lent pedig a keresztirányú metszeteket láthatjuk.

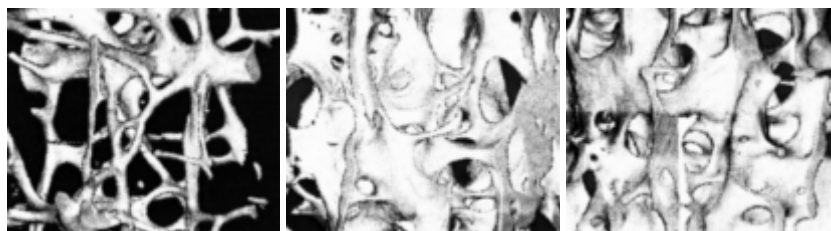
Egészen más terület a biológián belül a makromolekuláris krisztallográfia. Azt hiszem, nem kell hangsúlyozni, milyen fontos a fehérjék és az élő szervezetet felépítő egyéb alkotók pontos atomi szerkezetének ismerete. Evvel foglalkozik a makromolekuláris krisztallográfia.



11. ábra. a) Egy pók csápjának röntgen-fáziskontrasztképét láthatjuk a felső képen. Balra lent a b) képen a keresztirányú metszetek láthatók. Sok szögből felvéve a csápot, annak háromdimenziós, c) képe is előállítható.



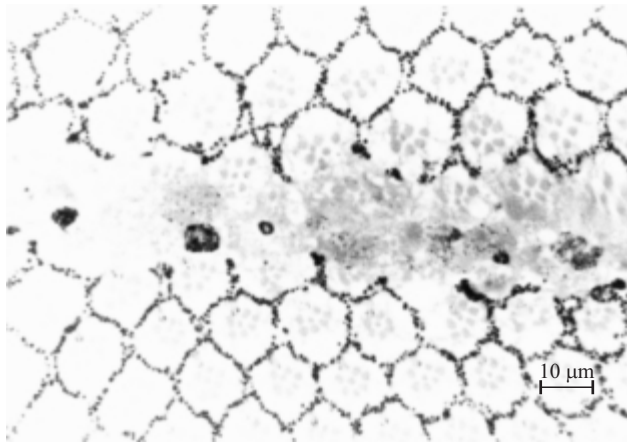
12. ábra. A bal oldali ábra a mioglobin egykristály-diffrakciós képét mutatja 100 ps-mal a beeső fényimpulzus után. A négy jobb oldali ábra az oxigénfelvétel következtében létrejövő szerkezetváltozás időbeli lefutását ábrázolja.



13. ábra. Egy nő különböző korban vett csontmintáinak háromdimenziós röntgen-mikrotomográfiai képei (balra 33 éves, középen 55 éves, jobbra 72 éves).

Most olyan példát szeretnék e területről mutatni, amely a hagyományos szinkrotrons krisztallográfia keretein túl lép, és nem egy statikus szerkezetet, hanem egy folyamat során változó szerkezetet vizsgál. Mint tudjuk, az élő szervezetben a hemoglobin felelős az oxigéntranszportért. A mioglobin pedig tárolja az oxigént, hogy az izmok azt fel tudják a későbbiekben használni energiatermelés céljából. A mioglobin szerkezetét már a 60-as években meghatározták, azonban nem volt világos, hogyan fér hozzá az aktív helyekhez, illetve hogyan távozik onnan az oxigén. Néhány 100 ps-os felbontással vettek fel diffrakciós képeket erről a folyamatról, és így sikerült a fenti problémát megoldani. A kísérletekben az oxigént szén-monoxidral helyettesítették. Egy tipikus diffrakciós képet mutat a 12. ábra bal oldali része, míg az időbeli fejlődést a négy jobboldali ábra mutatja.

Hogyan használhatjuk a fenti típusú ismereteket a gyakorlatban? A rovarokon végzett mikrotomografikus mérések kifejlesztése elősegítheti az emberi szervezet részeinek leképezésére alkalmas módszerek megvalósítását (ahogy azt a következők orvosi példán majd látjuk is). Ezen túl, a rovarok szerveinek részletes ismerete segíthet a kártevők elleni védekezésben is. Mivel a krisztallográfiai vizsgálatok lehetővé teszik az élő szervezet alkotói szerkezetének atomi szinten való ismeretét, illetve működ-



14. ábra. Musca szemén végzett sugárkezelés eredményeként létrejött nagyon keskeny roncsolt terület.

désük során történő atomi átrendeződések követését, így elősegíti különböző betegségek okának mélyebb megismerését, ezen keresztül új, hatásosabb gyógyszerek kifejlesztését. Végső soron életünk meghosszabbítását és az életminőség javítását várhatjuk a szinkrotronsugárzással szerzett biológiai ismeretektől.

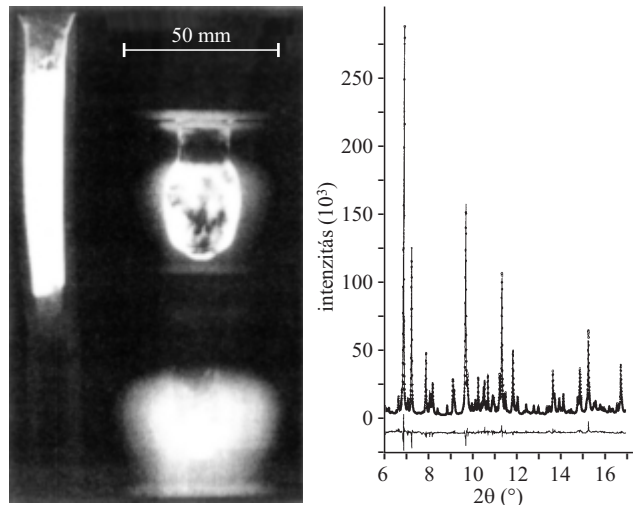
Végül az orvostudománybeli alkalmazásokra mutatok két példát.

Itt mind terápiára, mind diagnosztikára alkalmazható a szinkrotronsugárzás. Tekintsük először a diagnosztikát.

Egy újabban kidolgozott technikára, a csontok vizsgálatára alkalmas 3D mikrotomográfiára mutatunk egy példát. A 13. ábra felső részén egy 33, a középsőn egy 55 és az alsón egy 72 éves nő csontjának finomszerkezetét láthatjuk. A különbség önmagáért beszél. A tomográfia kombinálható elemanalízissel is, így még az is meghatározható, hogy a csontok különböző részein milyen anyagok dúsulnak fel, illetve hiányoznak. A fenti vizsgálatok eredményei lehetővé teszik a csonttritkulás folyamatának részletes megismerését, és így elősegítik megelőző terápiák kidolgozását.

Megemlíjtük, hogy hasonló eljárást alkalmaznak a szív koszorúereinek feltérképezésére. Az élő működő szívről olyan felvételek készíthetők, melyek felbontása néhány-szor 10 mikron. Ezek a vizsgálatok a manapság egyre gyakoribb szívbetegségek korai felismerésére és kialakulásának felderítésére adnak lehetőséget. Ilyen ismeretek birtokában jó esélyünk van a megelőzésre, illetve a hatásosabb gyógyításra.

Végül egy sugárterápiás kísérletet mutatunk. Hagyományos sugárkezelés esetén gyakori az egészséges szövetek károsodása is. Ezt úgy kerülhetjük el, hogyha az egészséges területen áthaladó sugárnyaláb olyan keskeny, hogy a megmaradó épp sejtek normális javító mechanizmusa ezt a vékony területet át tudja hidalni. A 14. ábra egy ilyen vékony nyaláb nyomát mutatja. Egy musca szemén végeztek sugárkezelést. Ezt a kis területet a környező sejtek idővel meg tudják gyógyítani. Még sok kísérletre van szükség, hogy hasonló terápiát embereken is biztonságosan lehessen alkalmazni. Ilyen módszerek kifejlesztése azonban olyan gyógyító eljárásokat eredményez-



15. ábra. Az ókori egyiptomiak által használt kozmetikumokról és gyógykenőcsökről készült radiogram (baloldalt) és pordiffrakciós felvétel (jobboldalt).

het, amelyben elkerülhető a hagyományos sebészi beavatkozás, és sok műtét „vér nélküli” kezeléssel váltható fel.

Utolsóként, érdekességképpen a szinkrotronsugárzás humán tudományokban való felhasználásának lehetősége mutatunk rá. Nehéz elképzelni, hogy a történelemtudósokat hogyan segítheti a szinkrotronsugárzás. A 15. ábrán egy az ókori egyiptomi sírokból előkerült tárolóedény röntgenvizsgálatának eredményét mutatjuk be. Mivel a röntgensugárzás az edény falán áthatol, az értékes lelet szétbontása nélkül megtudhatjuk, mi található benne. Sőt a pordiffraktogram részletes elemzése nemcsak azt mutatja meg, milyen anyag van az edényben, hanem azt is, hogy hogyan készítették azt. Esetünkben például kiderült, hogy az ókori egyiptomiak már ismerték a PbS , $PbCO_3$, $PbOHCl$ és a $Pb_2Cl_2CO_3$ előállításának technikáját, és ezeket nemcsak kozmetikumokként, hanem gyógyászati célokra is használták.

Ezzel befejeztük „körutunkat” a tudományok területén. Sajnos csak egy nagyon kis töredéket tudtunk bemutatni azon tudományos alkalmazásokból, amelyeket a röntgensugárzás és speciálisan a szinkrotron-tárológyűrűk lehetővé tesznek. Nem beszélünk például a mágneses anyagok vizsgálatáról, a litográfiáról (a félvezetőgyártásban alapvető jelentőségű), a topográfiáról (egykristályok hibáinak felderítésére alkalmas) stb. A lehetséges gyakorlati alkalmazások közül is csak nagyon kevés szó esett. Nem írtunk a szuperötvezetek repülő-, illetve autóalkatrészekben való felhasználásáról, de a modern félvezető elemek, folyadékkristály kijelzők, mágneses vékonyrétegek elektronikus iparban – számítógép-memóriaként, lapos képernyőként vagy nagykapacitású merevlemez tárolóként – való alkalmazásairól sem.

Reméljük, hogy ennek ellenére az olvasó általános benyomást szerzett arról, hogy a röntgensugárzás nagyon széles körben segíti életünk kellemesebbé tételét, és a drágának látszó nagyberendezések, mint például a szinkrotron-tárológyűrűk sokszorosan visszafizetik a rájuk költöttet.

DOMÉNEK KELETKEZÉSE ÉS ÁTALAKULÁSAI ANTIFERROMÁGNESESEN CSATOLT MULTIRÉTEGEKBE

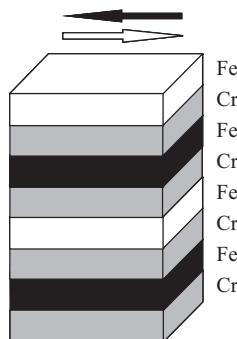
Nagy Dénes Lajos, Bottyán László, Deák László,
Major Márton, Szilágyi Edit, Tanczikó Ferenc
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Csatolt multirétegek: múlt, jelen, jövő

Kevés felfedezés futott be olyan gyors és látványos pályafutást a laboratóriumi alapkutatástól a mindennapi alkalmazásokig, mint az óriás mágneses ellenállás (*giant magnetoresistance*, GMR). Grünberg és munkatársai [1] 1986-ban ismerték fel, hogy Fe/Cr/Fe hármarrétegben a nem ferromágneses Cr megfelelő (pl. 1,3 nm körüli) rétegvastagsága esetén antiferromágneses csatolást közvetít a szomszédos ferromágneses Fe-rétegek között, amelyek mágnesezettsége ily módon – külső mágneses tér hiányában – egymással ellentétes irányba áll be. Hasonló mágneses csatolást később igen sok más fémes rétegszerkezetben (Co/Cu, Fe/FeSi, Fe/Ag stb.) is találtak. Természetesen az antiferromágneses szerkezet külső mágneses tér hatására részlegesen vagy teljesen összezáródik. Baibich és munkatársai [2] 1988-ban mutatták ki, hogy ez az összezáródás a rétegszerkezet elektromos ellenállásának több százalékos csökkenésével jár, ami a fémekben megfigyelhető tömbi mágneses ellenállás-változást egy-két nagyságrenddel felülmúlja; a jelenség ezért érdemelte ki az „óriás” jelzőt. A GMR-elven működő mágneses olvasófej működőképességét 1994-ben mutatták meg, majd 1997-ben piacra is került az első ilyen eszköz. Ma gyakorlatilag az összes létező merevlemez-tárolóban GMR olvasófejek működnek, és várhatóan az évtized végére a gépkocsik mágneses érzékelői (gépkocsinként 10–20 darab!) is ezen az elven fognak alapulni.

Jelen cikkben sem a fémes rétegszerkezetekben esetenként megfigyelhető antiferromágneses csatolás eredetével, sem az óriás mágneses ellenállás elméletével nem kívánunk foglalkozni – előbbi oka a nem ferromágneses fém vezetési elektronjai által a ferromágneses fémrétegek mágneses nyomatókai között közvetített kicserélődési kölcsönhatás, míg utóbbi a vezetési elektronok spinfüg-

1. ábra. A megfelelő vastagságú Cr-rétegek által közvetített csatolt antiferromágneses rendet alakít ki a Fe/Cr multiréteg Fe-rétegei között. Az egyes vasrétegek mágnesezettségeit fehér és fekete nyilak jelzik.



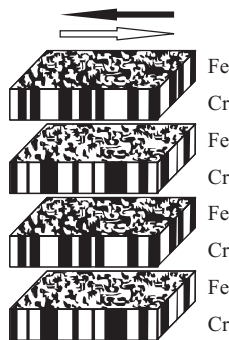
gő szórásában leli magyarázatát. Ehelyett azt vizsgáljuk meg, milyen mágneses doménszerkezetek alakulhatnak ki csatolt multirétegekben, illetve, hogy lehet-e és hogyan lehet e doménszerkezetek jellegét célzatosan alakítani. Megmutatjuk, hogy antiferromágnesesen csatolt multirétegek doménszerkezetének vizsgálatában egy néhány éve kifejlesztett mérési eljárás, a szinkrotron-Mössbauer-reflektometria igen hatékonynak bizonyul.

Csatolt multirétegek doménszerkezete

Csatolt multirétegeket a fent említett hármarrétegből úgy kaphatunk, hogy annak egy-egy rétegpárját (pl. Fe/Cr) sokszor megismételve egymásra növesztjük. Ily módon a ferromágneses rétegek mágnesezettségében a tömbi antiferromágnesekére emlékeztető, hosszú távú alternáló rendet kapunk (természetesen a tömbi antiferromágnesek atomi mágnesezettségének szerepét itt egy-egy ferromágneses réteg tömbi mágnesezettsége veszi át). Ilyen csatolt rétegszerkezeteket különféle leválasztási módszerekkel (molekulanyaláb-epitaxia, porlasztás, vákuumpárolgatás, elektrolyzisz stb.) készíthetünk. Egy antiferromágnesesen csatolt Fe/Cr multiréteg mágneses szerkezetét mutatja vázlatosan az 1. ábra.

Tudjuk, hogy a tömbi ferromágnesek mágnesezettsége általában nem homogén, hanem különböző irányítottaságú doménekből áll. Ennek oka, hogy a túlságosan nagy méretű, homogén mágnesezettségű tartományok szórt mágneses terének energiája meghaladja a doménfalak, vagyis olyan tartományok keltéséhez szükséges energiát, amelyekben a tömbi mágnesezettség iránya – természetesen a tömbi kicserélődési kölcsönhatás ellenében, amely az egyes atomok mágneses nyomatókai egymással párhuzamosan szeretné beállítani – folyamatosan változik. A doménekből álló mágneses szerkezet szórt tere nyilván sokkal kisebb, így megfelelő doménméret esetén kialakul a szórt mágneses tér és a doménfalak energetikai egyensúlya. Ugyancsak a szórt mágneses tér okozza a mágneses vékonyrétegek alakú anizotrópiáját is, amely a mágnesezettséget a vékonyréteg síkjába kényszeríti.

Antiferromágnesesen csatolt multirétegek esetén ezek a hatások jóval kisebbek, mint tömbi ferromágnesekben vagy azokból készült vékonyrétegekben, hiszen az ellentétesen álló ferromágneses rétegek szórt terei egymást részben kioltják, a mágneses erővonalak mintegy „rövidre záródnak”. Tekintettel azonban arra, hogy a mágnesesség ezekben a rendszerekben is tömbi ferromágneses rétegek hordozzák, a mágneses domének itt is kialakulnak, ha azok morfológiája el is tér a tömbi ferromágne-



2. ábra. Az 1. ábrán látható Fe/Cr multirétegben kialakuló „foltos” domének. Figyeljük meg a doménszerkezetnek a minta síkjára merőleges irányban kialakuló korreláltságát, ami az erős réteg–réteg csatolás következménye. Az ábra a Cr-rétegeket nem mutatja.

sekben megszokott doménekétől. A 2. ábra az 1. ábrán látható multirétegben kialakuló „foltos” doménszerkezetet mutatja vázlatosan. Látható, hogy az erős réteg–réteg csatolás következtében a második réteg doménszerkezete a legfelső réteg doménszerkezetének „negatívja”, míg a harmadik réteg doménszerkezete ismét az első rétegével azonos, és így tovább.

Hardner és munkatársai már 1995-ben rámutattak arra, hogy antiferromágnesesen csatolt multirétegek doménszerkezete nagymértékben befolyásolja mágneses ellenállásuk zaját: minél kisebbek a domének, a zaj annál nagyobb, hiszen ilyenkor a domén mágneses szabadsági fokaira jutó Zeeman- és anizotrópiaenergia a termikus energiával összemérhetővé válik. Ez a zaj oly mértékű is lehet, hogy megakadályozza az adott rétegszerkezet alkalmazását mágneses érzékelőkben. Ezért fontos, hogy egyrészt megbízható módszereink legyenek a multirétegek doménszerkezetének vizsgálatára, másrészt hogy olyan módszereket fejlesszünk ki, amelyekkel a doménszerkezet kézben tartható.

Röviden a reflektometriáról

Mágneses domének vizsgálatának legkézenfekvőbb és legelterjedtebb módja a magnetooptikai Kerr-effektus és az optikai mikroszkópia házasságából született Kerr-mikroszkópia. A mágneses mintát lineárisan poláros fényvel megvilágítva, annak polarizációs síkja a mintáról visszaverődve kissé elfordul, ezért a mikroszkópba polarizációs szűrőt építve („polarizációs mikroszkóp”) a mágneses domének láthatóvá válnak. Sajnos ez a módszer csak akkor alkalmazható, ha a legfelső ferromágneses réteg legalább 10–20 nm vastagságú; ennyi ugyanis nagyjából a fény behatolási mélysége. A gyakorlatban használt mágneses multirétegek jelentős részében azonban a ferromágneses rétegek ennél lényegesen vékonyabbak, így a fény több, antiparallel irányítottágú mágneses rétegen halad át, a polarizációs sík egyes rétegekben elszenvedett elfordulásai egymást kioltják; a domének láthatatlanná válnak. A feladatra a domének képi megjelenítésének egyéb módszerei (polarizációs fotoemissziós elektronmikroszkópia (PEEM), mágneses felületi mikroszkópia (MFM) stb.) is alkalmatlannak bizonyulnak. Ennek oka részben az, hogy a domének mágnesezettsége a minta síkjával pár-

huzamos, részben pedig, hogy az említett eljárások nagy külső térben nem működnek. Csatolt multirétegek doménszerkezete ma szinte kizárólag a reflektometria módszerével vizsgálható.

A reflektometriai módszerek lényege, hogy jellemzően 0,1 nm körüli hullámhosszú fotonokat vagy termikus neutronokat ejtve egy vékonyréteg-mintára, a külső totálreflexió kritikus szögéhez közeli, illetve azt valamivel meghaladó szögtartományban a sugárzás jelentős mértékben visszaverődik. Mivel a visszavert sugárzás amplitúdóját a minta különböző tartományából szórt hullámok interferenciája alakítja ki, a visszavert sugárzást a beesési és a visszaverődési szög függvényében megmérve a minta belső szerkezetéről kapunk diffrakciós jellegű információt. A mágneses szerkezet természetesen csak akkor vizsgálható a reflektometria módszerével, ha a szóban forgó sugárzás szórás amplitúdójának van a mágnesezettségtől függő komponense. Ez a feltétel neutronokra – azok mágneses nyomatéka következtében – mindig teljesül. Vékonyréteg-minták mágneses szerkezete valóban hatékonyan vizsgálható a *polarizált neutronreflektometria* (PNR) módszerével. Röntgenfotonokra számottevő mágneses szórás két esetben figyelhető meg: a) bizonyos (pl. 3d átmeneti fémek esetén az $L_{2,3}$) abszorpciók élek környékén; ez a mágneses sávokat is érintő sáv–sáv átmenetekkel kapcsolatos, és b) nukleáris rezonancia- (Mössbauer-) szórás esetén, ami a mágneses hiperfinom-kölcsönhatás következménye. A megfelelő reflektometriai módszerek a *mágneses rezonáns röntgenreflektometria* és a *szinkrotron-Mössbauer-reflektometria* (SMR).

Ha a beesési és a visszaverődési szög¹ egymással egyenlő, akkor *spekuláris* reflektometriáról beszélünk. A spekuláris reflektometria, amely a vékonyréteg-minták *síkra merőleges* szerkezetéről ad felvilágosítást, a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában már részletesebb ismertetésre került [3]. Ugyanebben a cikkben bemutattuk a szinkrotron-Mössbauer-reflektometria elveit és főbb alkalmazásait is, ami egyébként a *Fizikai Szemle* jelen számának egy másik cikkében [4] is szerepel, így e helyütt minderre nem térünk ki. Mindössze annyit említünk meg, hogy a spekuláris reflektívitás a diffrakció jól ismert Bragg-egyenletének megfelelően a

$$\Theta = m \frac{\lambda}{2d} \quad (1)$$

szögeknél mutat maximumokat, ahol λ a sugárzás hullámhossza, d a multiréteg síkra merőleges szerkezetének periódushossza, az m természetes szám pedig a reflexió rendjét jelenti.² Az (1) egyenletet a

$$d = m \frac{2\pi}{Q_z} \quad (2)$$

alakban is írhatjuk, ahol Q_z a szórásvektor síkra merőleges (z irányú) komponense.

¹ A reflektometria ezeket a szögeket nem a beesési merőlegestől, hanem a minta síkjától méri.

² Az (1) egyenlet a *refrakciós korrekció*t nem tartalmazza.

Hasonlóan a tömbi antiferromágnesek esetéhez, a ferromágneses rétegek alternáló mágneses irányítotttsága multirétegekben is cellakétszereződéshez vezet. Ez a reflektometriában szuperszerkezeti reflexiókat eredményez, amelyek az (1) egyenletben m feles értékeihez tartoznak. A továbbiak szempontjából igen lényeges, hogy ezek a reflexiók – lévén tisztán mágneses eredetűek – csak a mágneses szerkezetről hordoznak információt.

Ha a visszaverődési szög nem egyezik meg a beesési szöggel (sőt a visszavert nyalábot esetleg nem is a beesési síkban detektáljuk), akkor *nemspeculáris* (diffúz) reflektometriáról beszélünk. A nemspeculáris reflektometria a \mathbf{Q} szórásvektor síkbeli komponenseire is érzékeny, így ezzel a módszerrel a minta síkbeli szerkezetét, inhomogenitásait is feltérképezhetjük. Könnyen beláthatjuk, hogy a beesési síkban maradván, a detektor helyzetének rögzítésével pedig a beesési és a visszaverődési szög összegét állandó 2Θ értéken tartva, ugyanakkor a mintát egy, a beesési síkra merőleges tengely körül „billegtetve” a reflektált intenzitást valójában a szórásvektor Q_x komponensének függvényében mérjük, ahol az x tengely irányát a minta síkjának a beesési síkkal képzett metszésvonala jelöli ki. A diffúz reflektivitás $Q_x = 0$ körül általában maximumot mutat; a maximum ΔQ_x szélességét azon inhomogenitások ξ korrelációs hossza szabja meg, amelyekről az adott 2Θ szórési szög alatt megfigyelt szórás származik:

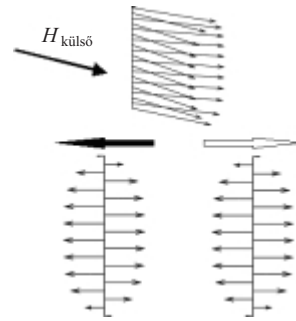
$$\xi = \frac{2\pi}{\Delta Q_x} \quad (3)$$

Ha tehát 2Θ értékét az (1) egyenlet egész m értékeinek megfelelő szerkezeti maximumok valamelyikére állítjuk be, akkor a vékonyréteg síkbeli szerkezeti inhomogenitásainak korrelációs hosszáról (a felületi és határréteg-durvaságról) kapunk információt. Ugyanakkor m feles értékei esetén a mágnesezettség síkbeli önkorrelációját mérjük; ξ ilyenkor a mágnesezettség síkbeli korrelációs hossza, más szóval éppen a vizsgálni kívánt antiferromágneses domének mérete.

Hogyan alakulnak ki, és hogyan „érnek meg” a multirétegek antiferromágneses doménjei?

Képzelnünk magunk elé egy antiferromágnesesen csatolt multiréteget, amelyet elegendően nagy külső mágneses térbe helyeztünk! Nyilvánvaló, hogy ilyenkor – annak ellenére, hogy a réteg–réteg kicserélődési kölcsönhatás az antiparallel beállást részesítené előnyben – valamennyi ferromágneses réteg mágnesezettsége egymással párhuzamosan, a külső tér irányába fordul. Mi történik, ha a külső tér értékét fokozatosan csökkentjük? Amikor elérjük a telítési tér tartományát, a multiréteg ferromágneses alrácsainak mágnesezettségei elkezdnek szétnyílni (3. ábra).

A szerkezet szétnyílása – véletlenszerűen – két különböző módon valósulhat meg. Felülről (a z tengely irányából) nézve a legfelső réteg (és vele együtt a páratlan sorszámú rétegek) mágnesezettsége elfordulhat az óramuta-



3. ábra. Telítésből csökkenő térben véletlenszerűen alakulhat ki kétféle mágneses szerkezet. Az ábra tetején az egyik szerkezet kialakulását látjuk kevésbé a telítési tér alatt. Az ábra alján a kétféle szerkezetet látható a külső mágneses tér iránya felől nézve.

tó járásával megegyező vagy azzal ellentétes módon (és természetesen a páros sorszámú rétegek mágnesezettségével ellentét értelemben fordul el). A telítési tér értéke a síkban nem állandó, hanem – mintakészítési okok következtében – kismértékű ingadozást mutat. Ezért a szerkezet szétnyílása a minta különböző helyein lényegében egyenszerű, de véletlenszerűen két különböző forgási értelemben indulhat el. Pontosan ez a mechanizmus vezet a „foltos” domének kialakulására.

Mi határozza meg a mágnesezettség korrelációs hosszát, vagyis a keletkező domének méretét? A multiréteg laterális szerkezeti egyenetlenségeinek tipikus hossza néhány 10 nm körül van. Ilyen kis domének azonban nem tudnak kialakulni. Ebben a döntő szerepet a réteg–réteg csatolás és a ferromágneses réteg tömbi kicserélődési kölcsönhatásának viszonya játssza. Ha az előbbi erős, akkor kis domének keletkeznek, hiszen viszonylag „olcsón” lehet a tömbi kicserélődés ellenében az egyes ferromágneses rétegekben doménfalakat létrehozni. Ellenkező esetben a keletkező domének nagyobbak lesznek. A keletkező domének mérete így nagymértékben függ a minta szerkezetétől és csatolásaitól, de 3d átmeneti fémekből készült csatolt multirétegek esetén a tipikus doménméret 1 μm körül, vagy valamivel ez alatt szokott lenni.

A külső tér értékét tovább csökkentve a felülről nézve többé-kevésbé V alakú szerkezet egyre jobban szétnyílik, közelítve a kis térben kialakuló, a külső térre merőleges jól ismert kollineáris antiferromágneses szerkezetet, az úgynevezett „spin-flop fázist”. Eközben a doménfalak szöge, és így az egységnyi hosszúságra jutó doménfal-energia ugyancsak növekszik. A rendszer a felületegységre eső doménfal-energiától csak a domének átlagos méretének növelése árán tud megszabadulni. A domének méretének növelése viszont doménfal-mozgással jár, ami disszipatív folyamat. Ezért csökkenő térben az antiferromágnesesen csatolt multirétegek doménjei méretének *spontán* és *irreverzibilis* növekedését várjuk. Ezt a folyamatot a domének *érésének* nevezzük. Az irreverzibilitás azt jelenti, hogy a teret ismét növelve a domének mérete mindaddig nem csökken, amíg a minta újra telítésbe nem kerül.

Bármennyire is kézenfekvőnek tűnik a domének keletkezésének ésérésének fenti forgatókönyve, az sem általánosan ismertnek, sem általánosan elfogadottnak nem mondható. A doménszerkezetet a legtöbb szerző egyse-

rűen a mágneses tér abszolút értékével, esetleg még a külső térnek a mágneses anizotrópia tengelyeihez viszonyított helyzetével hozza összefüggésbe, nem gondolva arra, hogy a doménszerkezet kialakulásában a mágneses tér egész története játszik szerepet. Azt, hogy a domének valóban a fent leírt módon keletkeznek és „érnek meg”, első alkalommal az SMR módszerével sikerült megmutatni.

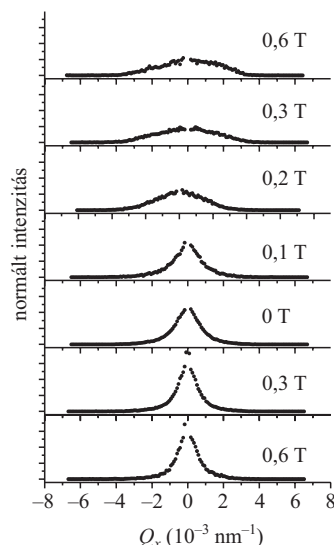
Egy epitaxiális $\text{MgO}(001)[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ multiréteg (szuperrács) szobahőmérsékleten felvett diffúz SMR görbéit láthatjuk a szórásvektor x komponensének függvényében a 4. ábrán.³ A multiréteg telítési tere a mágnesezettség síkbeli könnyű irányában, ahogyan a külső mágneses tér a mérés során állt, 850 mT volt. Az 57-es tömegszámú Fe-izotóp alkalmazására azért volt szükség, mert a nukleáris rezonanciaszórás ennek az izotópnak a 14,4 keV-es átmenetén következik be. A mérés során 2Θ értéke $0,80^\circ$ -ra volt állítva, ami az $m = 1/2$ -es antiferromágneses Bragg-csúcsnak felel meg. Jól látható, hogy a külső mágneses teret telítésből csökkentve, a diffúz görbe szélessége 200 mT-ig lényegében nem változik. A domének méretét ebben a tartományban a (3) egyenlet alapján körülbelül $1,6 \mu\text{m}$ -nek találjuk. A teret tovább csökkentve, a 200 mT – 100 mT tartományban következik be a domének „érése”: az elkeskenyedő diffúz reflektivitási görbéből megállapíthatjuk, hogy a domének átlagos mérete mintegy $4,5 \mu\text{m}$ -re nő. A teret remanenciából ismét emelve, a diffúz görbe szélessége már nem változik: az érési folyamat valóban irreverzibilisnek bizonyul [5].

Készíthetünk-e még nagyobb doméneket?

A domének érése során a doménfalak mozgatásának szükségessége akadályozza meg, hogy a domének mérete egy adott határon túl nőjön. Van-e mód arra, hogy a domének méretét a doménfalak mozgatása nélkül tovább növeljük?

Ha egy négyfogású síkbeli mágneses anizotrópiával rendelkező antiferromágnesesen csatolt szuperrácsra (ilyen a már említett epitaxiális Fe/Cr szuperrács is) a mágnesezést egyik síkbeli könnyű irányában adunk nagy mágneses teret, majd e teret fokozatosan csökkentjük, az előbb leírt érési folyamat zajlik le, miközben az egyes ferromágneses rétegek mágnesezettségei zérus térben a merőleges könnyű irányban helyezkednek el. Ha most ez utóbbi könnyű irányban adunk a mintára fokozatosan növekvő teret, a spin-flop átmenet kritikus terét elérve a mágnesezettségek hirtelen 90° -os elfordulással hozzák létre az új spin-flop fázist; a spin-flop átmenet az SMR módszerével jól nyomon követhető [6]. Ez az elfordulás – ismét véletlenszerűen – bekövetkezik az óramutató járásával megegyező vagy azzal ellentett értelemben. Ha azonban a minta valamelyik tartományában az elfordulás például az óramutató járásának irányában következett be, akkor a szomszédos tartományok is hasonló értelemben fognak elfordulni, hiszen így a doménfalak eltűnnek,

³ A mérés az ESRF ID18-as nukleáris rezonanciaszórási nyalábjánál történt.

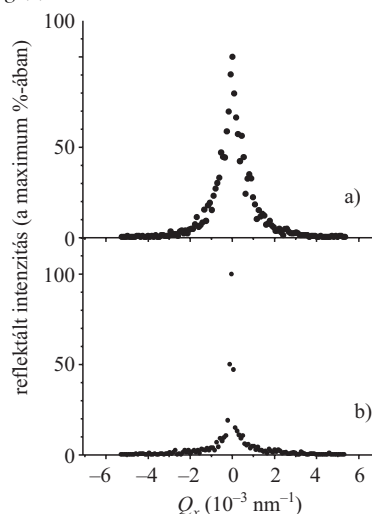


4. ábra. Domének érése egy antiferromágnesesen csatolt $\text{MgO}(001)[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ szuperrácsban. A szobahőmérsékleten felvett diffúz SMR görbék könnyű mágnesezési irányban alkalmazott csökkenő térben bekövetkező elkeskenyedése a domének spontán méretnövekedését mutatja. A mágneses tér története az ábrán felülről lefelé halad. Növekvő térben a domének mérete tovább nem változik.

míg ellenkező esetben 180° -os doménfalak keletkeznek. Ez a doméndurvulási folyamat nem a doménfalak mozgásával, hanem azok eltűnésével valósul meg, így azt elvben semmi nem korlátozza; a domének mérete „minden határon túl” nőhet.

Az antiferromágnesesen csatolt szuperrácsokban a spin-flop átmenet során bekövetkező doméndurvulást ugyancsak a diffúz SMR módszerével sikerült kimutatni.⁵ Az 5. ábrán ismét a már említett $\text{MgO}(001)[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ szuperrács diffúz SMR görbéit [7] láthatjuk a szórásvektor x komponensének függvényében. Jól megfigyelhető, hogy a görbék a spin-flop átmenet

5. ábra. Domének durvulása egy antiferromágnesesen csatolt $\text{MgO}(001)[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ szuperrácsban. A szobahőmérsékleten felvett diffúz SMR görbe telítési tér után remanenciában „érett” domének jelenlétére utal (a). A 13 mT külső mágneses térben bekövetkező spin-flop átmenet során a görbék hirtelen elkeskenyednek; a spin-flop átmenet felett 35 mT-ban nagyrészt már „óriás” domének figyelhetők meg (b).



során hirtelen nagymértékben elkeskenyednek. Az átmenet előtti, már ismert, körülbelül $4,5 \mu\text{m}$ nagyságú domének legalább $30 \mu\text{m}$ körüli doménekké „fornak össze”. A durvult domének valószínűleg még ennél is jóval nagyobbak, de ennek megállapítását a berendezés felbontóképessége nem tette lehetővé.

Összefoglalás és köszönetnyilvánítás

A bemutatott példák meggyőzően bizonyítják, hogy a szinkrotronsugárzás súroló beesésű nukleáris rezonanciaszórása, a szinkrotron-Mössbauer-reflektometria az antiferromágnesesen csatolt multirétegek doménszerkezete tanulmányozásának hatékony eszköze. A diffúz SMR módszerével végzett doménszerkezeti vizsgálatok megmutatták, hogy az alkalmazott külső mágneses terek alkalmasan megválasztott sorozatával a domének mérete nagymértékben befolyásolható és tudatosan alakítható.

Az ismertetett eredmények elérésében igen fontos szerepet játszott a Leuveni Katolikus Egyetemmel folytatott sok éves együttműködés. A mérések elvégzését az ESRF által rendelkezésre bocsátott nyalábidő, valamint

az ESRF munkatársainak aktív részvétele tette lehetővé. A kutatási projekt anyagi támogatásáért köszönet illeti az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramokat (T 047094 sz. projekt), a Tét Alapítványt (B-2/02 sz. magyar-flamand projekt) és az Európai Bizottságot (a DYNASYNC konzorcium NMP4-CT-2003-001516 sz. STREP projektje).

Irodalom

1. P. GRÜNBERG, R. SCHREIBER, Y. PANG, M. B. BRODSKY, H. SOWERS – Phys. Rev. Lett. 57(1986) 2442
2. M.N. BAIBICH, J.M. BROTO, A. FERT, F. NGUYEN VAN DAU, F. PETROFF, P. EITENNE, G. CREUZET, A. FRIEDERICH, J. CHAZELAS – Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472
3. NAGY D.L. – Fizikai Szemle 47(1997) 150
4. DEÁK L., BOTTYÁN L., MAJOR M. – Fizikai Szemle 54 (2004) 372
5. M. MAJOR, D. AERNOUT, L. BOTTYÁN, A. CHUMAKOV, B. CROONENBORGHES, L. DEÁK, B. DEGROOTE, J. DEKOSTER, O. LEUPOLD, J. MEERSCHAUT, D.L. NAGY, R. RÜFFER, J. SWERTS, E. SZILÁGYI, F. TANCZIKÓ, K. TEMST, V. VANHOOF, A. VANTOMME – közlés előtt
6. L. BOTTYÁN, L. DEÁK, J. DEKOSTER, E. KUNNEN, G. LANGOUCHE, J. MEERSCHAUT, M. MAJOR, D.L. NAGY, H.D. RÜTER, E. SZILÁGYI, K. TEMST – J. Magn. Magn. Mater. 240 (2002) 514
7. D.L. NAGY, L. BOTTYÁN, B. CROONENBORGHES, L. DEÁK, B. DEGROOTE, J. DEKOSTER, H.J. LAUTER, V. LAUTER-PASYUK, O. LEUPOLD, M. MAJOR, J. MEERSCHAUT, O. NIKONOV, A. PETRENKO, R. RÜFFER, H. SPIERING, E. SZILÁGYI – Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 157202

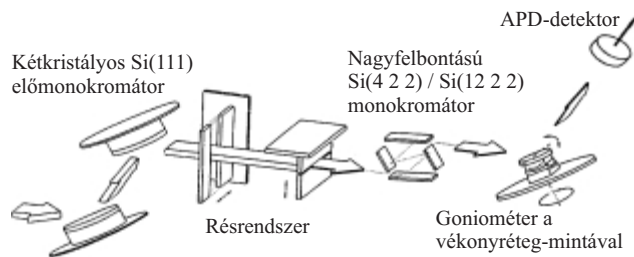
VÉKONYRÉTEGEK SZINKROTRON-MÖSSBAUER-REFLEKTOMETRIAI VIZSGÁLATA STROBOSZKÓPOS DETEKTÁLÁSSAL

Deák László, Bottyán László, Major Márton
KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet

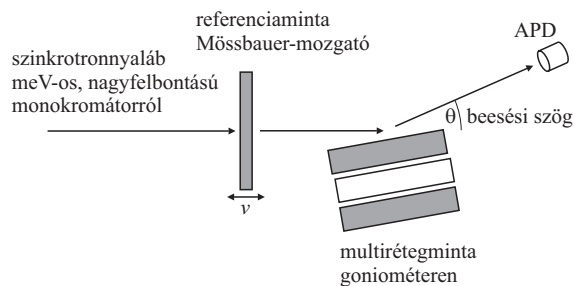
A γ -fotonok visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpciójának (szórásának) jelenségét *Mössbauer-spektroszkópia* néven csaknem fél évszázada alkalmazzák az anyagtudományban. Az idők során e spektroszkópiai módszer folyamatosan fejlődött, számos új ága jött létre. Ilyen új lehetőség, a *szinkrotronsugárzás* nukleáris rezonanciaszórása, amelyet kísérletileg először éppen húsz évvel ezelőtt sikerült megfigyelni. Ahogy az elnevezés mutatja, a Mössbauer-spektroszkópia hagyományos radioaktív forrása helyett alkalmazható tehát szinkrotronsugár-forrás is, kihasználva a szinkrotronsugárzás előnyös tulajdonságait. A szinkrotronsugárzás kis felületre fókuszálható óriási intenzitása jól használható kisméretű minták vizsgálata során, például a nagy nyomáson vagy vékonyrétegeken végzett kísérletekben. A szinkrotronsugárzás polarizáltsága lehetőséget ad a hiperfinom terek irányának meghatározására. A párhuzamos, jól kollimált nyalábszerkezetnek köszönhetően nemcsak előreszórási (transzmissziós), hanem például reflexiós geometriában is végezhetünk méréseket.

A vékonyréteg-kutatás szempontjából a nukleáris rezonanciaszórás *reflektometriai elrendezésben* való detek-

tálása rendkívül fontos, hiszen ekkor a Mössbauer-spektromokból kinyerhető szokásos, a hiperfinom-kölcsönhatásokra vonatkozó információk *mélységselektív* meghatározására is lehetőségünk van. A mélységselektivitást elméletileg a fotonok hullámhossza korlátozza, ami az általában használt rezonanciaenergiákra atomi méretű (pl. a vas 57-es tömegszámú izotópja $E = 14,4 \text{ keV}$ -os Mössbauer-átmenetére $\lambda = 0,086 \text{ nm}$). A hiperfinom terek így kísérletileg is közelítőleg atomi felbontásban határozhatók meg. A szinkrotronsugárzás polarizáltságának köszönhetően pedig nemcsak a nagyságuk, hanem még az „irányuk” is kiértékelhető [1]. Mivel a röntgenhullámok tartományában az anyagok törésmutatója alig különbözik az egységtől, a rétegszerkezet szempontjából releváns beesési és visszaverődési szögek a felülettől mérve tipikusan 2 fok alattiak, azaz súroló beesésről beszélhetünk. Az irodalomban a nukleáris rezonanciaszórás alapuló fenti vékonyréteg-vizsgálati módszert *szinkrotron-Mössbauer-reflektometriának* (SMR) nevezzük. A módszert az elmúlt évtizedben KFKI RMKI Nukleáris Szilárdtestfizikai Osztályán számos nemzetközi együttműködés keretében fejlesztettük és alkalmaztuk [1, 2].



1. ábra. Az SMR-mérés sematikus kísérleti elrendezése



2. ábra. A stroboszkópos SMR kísérleti elrendezése

A szinkrotronsugár-forrással felvett spektrumok értelmezése lényegesen eltér a hagyományosan, radioaktív forrással felvett spektrumokétól. A radioaktív források 4π térszögben, véletlenszerűen sugároznak ki γ -fotonokat, melyeket kvázi-monokromatikus hullámoknak tekinthetünk. Ugyanakkor a szinkrotronnyaláb 50–100 ps szélességű, periodikus impulzusokból áll, amelyek következképpen nem monokromatikusak. Az időben keskeny nyaláboknak ugyanis energiában széles eloszlás felel meg. A nyaláb egyszerre gerjeszti a hiperfinom-kölcsönhatásoktól felhasadt nívók közötti Mössbauer-átmeneteket. A magok koherensen, a nívófelhasadásokra jellemző „lebegést” mutatva bomlanak le. A Mössbauer-spektroszkópia energiafüggő spektrumai helyett, szinkrotronsugár-forrás alkalmazása esetén tehát „idő-spektrumokat”, más kifejezéssel „idődifferenciális SMR-spektrumokat” mérhetünk. Az időspektrumok és az energiaspektrumok egymással Fourier-transzformációs kapcsolatban állnak, habár nem a mért intenzitások, hanem a szórási amplitúdók egymás Fourier-transzformáltjai. Az SMR kísérleti elrendezését az 1. ábrán mutatjuk be. A szinkrotronsugárzás réseken keresztül, elő-, majd nagyfelbontású monokromatizálás után éri el a goniométeren esetlegesen kriosztátban, és/vagy külső mágneses térben elhelyezett mintát. A szórt fotonok a spekuláris reflexiót követően a detektorba jutnak, amelynek jeleit idő-amplitúdó konverzió után a szinkrotronimpulzustól eltelt idő függvényében sokcsatornás analizátorban számláljuk.

Az előmonokromátor energiefelbontása 14,4 keV röntgenenergia körül jellemzően 10 eV, míg a nagyfelbontású monokromátoré néhány, esetleg néhány tized meV, tehát a mintára jutó nyaláb jelentős szélességben lefedi a hiperfinom-kölcsönhatások tipikusan 10 neV-os energiatartományát. Minthogy a fotonok a minta elektronjain a teljes energiatartományban szórást szenvedhetnek, és ezen nem rezonáns, elektronikusan szórt fotonok száma a valóban rezonánsan szórt fotonok számát 5–8 nagyságrenddel meghaladhatja, valamint mivel ezen a skálán további energiadiszkriminációra semmilyen detektor nem képes, a szinkrotron pulzált idő-struktúráját kihasználva idő szerinti differenciálással választjuk ki a rezonáns fotonokat. A nem rezonáns, elektronikus szórás ugyanis *azonnali*, míg a rezonánsan is szórt fotonok *késleltettek*. Ezért manapság detektálásra a néhány ns időfelbontással rendelkező lavinadiódát (Avalanche Photo Diode – APD), illetve a más magéletartam-méréseknél is elterjedt gyors-lassú sémát használjuk. A szinkrotronimpulzust követő néhány detektorfelbontásnyi időn belül az elektronok által szórt,

ezután pedig a következő impulzus megérkezéséig a késleltetett fotonok detektálhatók.

A fentiek alapján háromféle reflektometriai mérést tudunk elvégezni. Az első mérés a már említett *idődifferenciális SMR*, ami rögzített beesési szög mellett az időspektrum meghatározását jelenti. Mivel általában nincs lehetőség elegendően sok beesési szögnél az idődifferenciális spektrum kellő statisztikával történő meghatározására, úgynevezett *időintegrális SMR*-méréseket is végzünk. Az időintegrális mérés során minden, a szinkrotronimpulzust követő adott időintervallumon belül érkező késleltetett foton detektálunk a beesési szög függvényében. Az időintegrális SMR-görbék fontos szerkezeti információkat hordoznak, megmutatják például, hogy milyen beesési szögeknél várható elegendően nagy beütésszám az idődifferenciális mérések során.

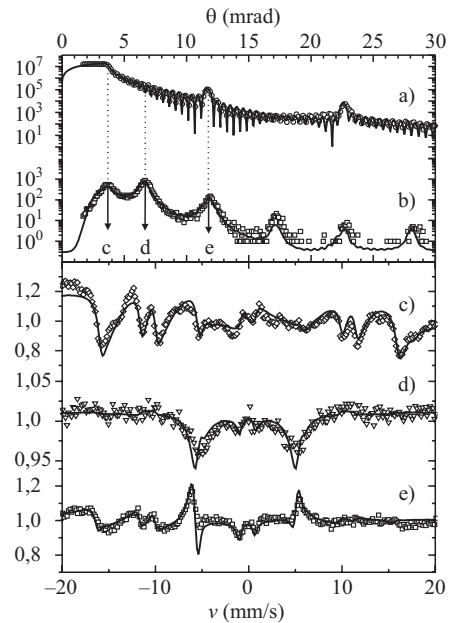
A harmadik típusú mérés a *prompt röntgen-reflektometria*, mely mérést az időintegrális spektrumok felvételével azonos időben is elvégezhetünk. Elterjedten az itt vázolt három különböző mérés együttes elvégzését és kiértékelését nevezzük *SMR-mérések*.

Az említett SMR-mérések kiértékelésénél problémát jelent, hogy a szokásos energiaspektrumok helyett relatíve bonyolult lefutású idődiagramokkal kell dolgoznunk. A leuveni egyetemen kidolgozott új módszer – a *stroboszkópos detektálás* – alkalmazásával a szinkrotronos méréseket is felvehetjük az energia függvényében [3, 4]. Ezek a spektrumok bizonyos értelemben hasonlóak a hagyományos Mössbauer-spektrumokhoz. (A stroboszkópia természetesen nem csak reflektometriai geometriában alkalmazható, de mi itt a reflektometria esetére szorítkozunk.) A stroboszkópos detektálás során a minta elé (vagy mögé) egy további abszorbenst, egy referenciamintát helyezünk Mössbauer-mozgatóra (2. ábra). Adott beesési szög esetén a spektrumok a gerjesztés óta eltelt időn kívül így a referenciaminta sebességétől is függenek. Az időintegrálás után tisztán sebességfüggő (azaz energiafüggő) spektrumokat kapunk, hiszen a mozgató a Doppler-effektus következtében a referenciaminta magnívóit az aktuális sebességnek megfelelően eltolja. A Mössbauer-spektroszkópiában az energiát sebességegységekben szokás megadni, ami a stroboszkópos detektálás használatával szinkrotronsugár-forrás alkalmazása mellett is lehetséges.

A stroboszkópos spektrumokkal kiválthatjuk tehát az idődifferenciális spektrumokat. Természetesen az adott kísérletben vizsgált probléma határozza meg, hogy az idődifferenciális vagy a stroboszkópos detektálási mód alkalmazása célszerűbb. Bonyolult kémiai szerkezetek

esetében a stroboszkópos detektálás lehet előnyösebb, hiszen közvetlenül a rezonanciavonalakat láthatjuk, míg a nagy pontosságot igénylő, de egyszerűbb szerkezetű anyagokon végzett méréseknél a referenciáminta elhagyása, azaz az idődifferenciális mérés a kedvezőbb.

A stroboszkópos SMR-mérések kiértékelésének elméletét a KFKI RMKI-ban dolgoztuk ki, míg ugyancsak mi végeztünk először ilyen típusú kísérletet a japán SPring-8 szinkrotronsugár-forrás rezonanciaszórás nyalábjánál. Az elv működőképességét bizonyítandó, egy MgO(001) hordozóra epitaxiálisan növesztett $[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ antiferromágneses multiréteg SMR-méréseit végeztük el. Az eredményeket a 3. ábrán mutatjuk be. A röntgenreflektogramot a 3.a ábrán láthatjuk. A görbén a rétegszerkezet periodicitása (Fe–Cr) következtében megjelenő első és másodrendű szuperrács Bragg-reflexiókat figyelhetjük meg, míg a gyors oszcillációk a teljes rétegvastagságnak megfelelő interferencia miatt fellépő Kieszig-oszcillációk. Az időintegrált SMR-görbét a 3.b ábrán mutatjuk. Az erős rezonanciaabszorpció miatt a teljes vastagságnak megfelelő oszcillációk ezen a spektrumon már nem figyelhetők meg. A 3.a ábrán látott Bragg-csúcsok itt is megjelennek, de a réteg-antiferromágnesség (és ennek következtében a szomszédos vasrétegek mágnesezettségének ellentétes irányú beállása) miatti cellakettőződés további Bragg-csúcsokat is eredményez. Ennek az az oka, hogy a rezonáns fotonok elsősorban a minta hiperfinom mágneses tere tekintetében érzékenyek a rétegszerkezetre. Az első három csúcsot nyilakkal jelöltük meg. E csúcsok rendre: a teljes visszaverődés határ-szögénél fellépő csúcs (c), az antiferromágneses Bragg-csúcs (d), valamint a vas–króm periódusnak megfelelő, a 3.a ábrán is megjelenő, úgynevezett strukturális Bragg-csúcs (e). A stroboszkópos SMR-spektrumokat a fent említett három beesési szögnél vettük fel (3.c–e ábrák). A vas jól ismert rezonanciavonalain kívül (ebben az elrendezésben négy rezonanciavonalat várnánk $v = \pm 0,84 \text{ mm/s}$ és $v = \pm 5,31 \text{ mm/s}$ energiáknál) további rezonanciavonalak is fellépnek. Ennek az az oka, hogy a szinkrotronimpulzusok T_b periódusidővel követik egymást, ezért az ennek megfelelő h/T_b energia (ahol h a Planck-állandó) egész számú többszöröseivel a valódi rezonanciáktól eltérő energiákon (sebességeken) szintén rezonanciavonalak jelennek meg. Ezeket nevezük stroboszkópos rezonanciavonalaknak. A kísérlet során $T_b = 8 \text{ ns}$ -os időablakot használtunk, ami a fentiek szerint körülbelül 10 mm/s sebességnek (energiának) felel meg, azaz a 3.c–e ábrákon a ± 1 -rendű stroboszkópos rezonanciákat is megfigyelhetjük. A 8 ns -os időablak az ^{57}Fe mágneses hiperfinom-spektrumának stroboszkópos rendjei már csaknem szeparáltak. Ennél rövidebb periódusidejű szinkrotronmódus azért nem használható, mert még nincsenek olyan gyors detektorok, hosszabbak pedig azért nem, mert a rendek jelentősen átfednének, és a mintára jellemző rezonanciaspektrumot elfednék. Azért kellett a méréseket a japán SPring-8 szinkrotronnál végezni, mert a világon csak ott van jelenleg a fenti kívánalmaknak megfelelő időstruktúrával rendelkező szinkrotronnaláb. A figyelmes olvasónak szembeötlő, hogy a 3.c ábrán a stroboszkópos rezonanciák dominálnak, míg a 3.d ábrán



3. ábra. $[^{57}\text{Fe}(2,6 \text{ nm})/\text{Cr}(1,3 \text{ nm})]_{20}$ antiferromágneses multiréteg röntgen-reflektometriai (a), időintegrált SMR- (b) és stroboszkópos SMR-spektrumai. A (c), (d) és (e) spektrumok a nyilakkal jelölt beesési szögek felvett méréseket mutatnak.

szinte meg sem figyelhetők, szinte csak a központi Mössbauer-vonalakat láthatjuk. Szintén érdemes észrevenni a 3.c és 3.e spektrumok $+1$ és -1 stroboszkópos rendjeinek intenzitásában mutatkozó különbséget. Mindezek pontos magyarázatát a [5] hivatkozásban, a stroboszkópos SMR elméletét ismertető közleményünkben adjuk meg.

A stroboszkopikus SMR-méréseket *szimultán* értékeltük ki, a 3. ábrán a folytonos vonalak ennek az illesztésnek felelnek meg. Modellünkben az ötvözetlen α -vasban mérhető szobahőmérsékleti hiperfinom teret a szomszédos rétegekben ellentétes irányúnak rögzítettük. Az elektronikus törésmutatókat szintén az irodalmi értékre rögzítettük, és a periodikus szerkezetben csupán a vas- és krómréteg vastagságát és a felületi, felületközi érdességeket és a hiperfinom tér nagyságát hagytuk illesztendő paraméternek. Figyelembe véve az elmélet bonyolultságát, valamint több független mérés szimultán illesztését, az illeszkedés igen jónak mondható.

Az SMR a vékonyréteg-kutatások bár speciális, de rendkívül hasznos eszköze. Ahogy a Mössbauer-spektroszkópiának is számos változata alakult ki, úgy a szinkrotronsugárzás nukleáris rezonanciaszórását kihasználó módszerek is rendkívüli ütemben fejlődnek. Fenti példában egy új alkalmazás, a stroboszkópos SMR működőképességét demonstráltuk.

Irodalom

1. E. GERDAU, H. DE WAARD – Hyperfine Interact. 123–125 (2000) a tématerület összefoglaló cikkeinek gyűjteménye
2. L. DEÁK, L. BOTTYÁN, D.L. NAGY, H. SPIERING – Physica B 297(2001) 113–117
3. R. CALLENS, R. COUSSEMENT, C. L'ABBE, S. NASU, K. VYVEY, T. YAMADA, Y. YODA, J. ODEURS – Phys. Rev. B 65 (2002) 160404(R)
4. R. CALLENS, R. COUSSEMENT, T. KAWAKAMI, J. LADRIERE, S. NASU, T. ONO, I. SERDONS, K. VYVEY, T. YAMADA, Y. YODA, J. ODEURS – Phys. Rev. B 67(2003) 104423

MÁSODLAGOS AEROSZOLOK NITROGÉNKOMPONENSEINEK MÉRÉSE NAGY IDŐFELBONTÁSSAL

Török Szabina, Osán János
KFKI Atomenergia Kutatóintézet

A tüzelésből származó légszennyezés talán az a folyamat, amelynek szabályozása már az ipari forradalom idején megkezdődött és a mai napig mind a nemzeti, mind a közösségi környezeti szabályozás egyik legfontosabb területe. Az energiatermeléssel és -felhasználással szemben követelmény, hogy társadalmilag elfogadható legyen, valamint a környezeti szempontokat és a fenntartható fejlődés igényeit is kielégítse. E követelmény nehezen feloldható ellentmondásait azonban nem könnyű racionálisan kezelni.

A fosszilis energiaciklus során a légkörbe juttatott kén-dioxid eredetű komponensek hosszú ideig megmaradnak a légkörben és teljes hatásukat csak regionális skálán (2000 km sugarú környezetben) fejtik ki. A nitrogén-oxidokra ez nem teljesen igaz, mivel azok légköri tartózkodási ideje nem több, mint néhány nap (bizonyos körülmények között csak néhány óra), és az illékony organikus komponensekkel együtt prekursorai a fotokémiai szmognak [1]. A SO₂ és a NO_x elsődleges szennyezők átalakulása során másodlagos kén- és nitrogénvegyületek keletkeznek. E vegyületek egy része másodlagos részecskék formájában van jelen a légkörben, amelyek a savas kiülepedésért felelősek. Nemcsak környezet-egészségügyi, de klimatológiai szerepük is jelentős, ezért megfelelő vizsgálati módszerekre van szükség, hogy nagy időfelbontással kémiai tulajdonságaikat, egymásba történő átalakulásukat nyomon követhessük.

Manapság a gáznemű légszennyezők koncentrációit akár percenként is leolvashatjuk a levegőminőségi monitoring hálózat készülékeiről. A szilárd légszennyezők kémiai összetevőinek koncentrációi esetében általában csak napi átlagokat mérünk a hosszú mintavétel miatt. Ha méréseinkből az aeroszol részecskék légköri viselkedésére is kíváncsiak vagyunk, meg kell határoznunk azok méretét – vagyis a légkörfizikában használatos mennyiséget, az aerodinamikai átmérőt – hiszen a részecskék ülepedése, illetve nagy távolságokra való eljutása ettől a paramétertől függ. Kíváncsiak erre a mennyiségre a levegőkörnyezettel foglalkozó epidemiológusok is, hiszen a légszennyezők ülepedése a légutakban a részecskék méretétől függ. Erre több lehetőség is adódik, akár közvetlenül, például a részecskék fényszórásának mérésével, akár közvetve, a méretük szerint frakcionált mintavétellel. Ilyen mintavétel esetén a kémiai komponenseket közvetlenül az egyes frakciókból meghatározva az átlagos aerodinamikai átmérőkön kívül összetételi információ is rendelkezésünkre áll. Frakcionált mintavételt például kaszkádimpaktorról végezhetünk, amelynek egymás utáni fokozatainak a növekvő áramlási sebességek miatt egyre kisebb átmérőjű részecskék csapódnak be az egymás utáni lemezekre.

Az aeroszolok nitrogénkomponenseinek koncentrációit a szokványos laboratóriumi módszerekkel azok ma-

gas kimutatási határa miatt csak napi átlagos mintából lehetett meghatározni. *Mészáros* és munkatársai [2] megmutatták, hogy az aeroszolok nitrogénkomponenseinek arányai az egyes méretfrakciókban jelentős szezonális változást mutatnak. Feltehető, hogy e komponensek napi változása is jelentős, mivel részben másodlagos, részben primer aeroszol eredetűek.

A nitrogéntartalmú aeroszol részecskék azonosítására néhány perces időfelbontást sikerült elérnie *Laskin*nak és munkatársainak [3], akik egy néhány napos expedíció mintáiban 500 000 részecskét különböztettek meg pásztázó elektronmikroszkópos méréssel, és a részecskék által emittált karakterisztikus röntgensugárzás nettó intenzitása alapján osztályozták őket. Az időfelbontást egy speciális mintavevővel sikerült elérniük, ami lényegében impaktor, amelyet egy mágneses lapra helyeznek. A mintavevő lapot egy XY-asztal mozgatja. Két méretfrakciót különböztetnek meg, a 0,2–0,7 μm és a 0,7–2,5 μm közöttit. Az általuk definiált részecskeosztályok alapján valójában csak az ammónium-szulfátot tudták megkülönböztetni a nitrogéntartalmú szerves részecskéktől. Elért eredményeik azért is vitathatók, mert az ammónium-szulfát és -nitrát részecskék az elektronnyalábban a nagy energiadepozíció hatására könnyen elbomlanak.

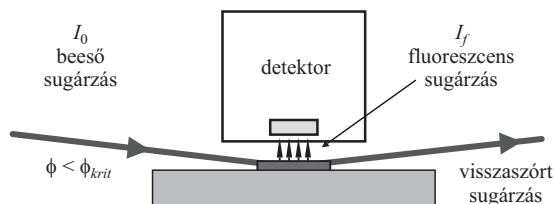
A totálreflexiós NEXAFS módszer a nitrogén K élénél

A szinkrotronsugár-forrásoknál megvalósítható NEXAFS (*Near Edge X-ray Absorption Fine Structure*, magyarul: a röntgenabszorpció él közvetlen környezetének finomszerkezete) spektroszkópia nagy érzékenysége miatt ideális módszer lehet a nitrogénkomponensek roncsolásmentes meghatározására igen kis mennyiségekből, hiszen nagy időfelbontású aeroszolkoncentrációk méréséhez olyan analitikai módszerre van szükség, amely akár 1 pg mennyiségeket is ki tud mutatni. Az 1. táblázatban a leggyakrabban alkalmazott laboratóriumi módszerekkel és a szinkrotron abszorp-

1. táblázat

Analitikai módszerekkel elérhető legkisebb kimutatható mennyiségek (LKM) és az ehhez tartozó legkisebb levegőmintátér fogat aeroszolok nitrogénkomponenseinek meghatározására

Analitikai módszer	LKM/mintában	Legkisebb térfogat
Ionkromatográfia	~0,1 mg/l	~5 m ³
Elektron-spektroszkópia (ESCA)	0,1% a minta 20 nm felületén	0,5 m ³
TXRF-NEXAFS	500 fg	10 l



1. ábra. TXRF-NEXAFS mérési elrendezés sematikus ábrája

ciós mérőcsatornán jellemzően elérhető legkisebb kimutatási határokat mutatjuk be.

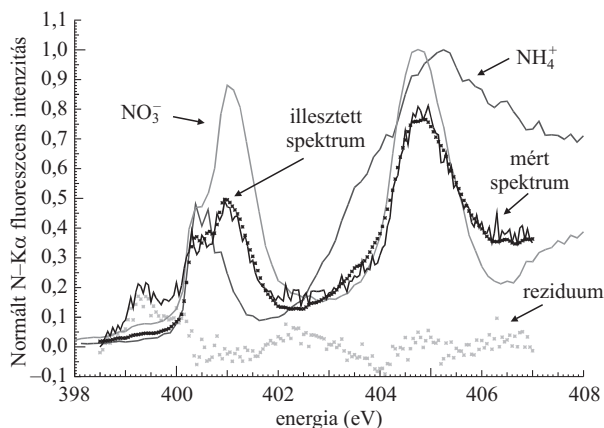
Egy osztrák kutatócsoport korábban eredményesen használta a fluoreszcens módú NEXAFS spektrometriát totálreflexiós geometriában (angol rövidítéssel TXRF-NEXAFS) cianid komponensekben a nitrogén meghatározására [4]. Az már korábban is ismert volt, hogy rendkívül kis mennyiségek kimutatására alkalmas a módszer, de mivel a totális reflexión alapul, ezért csak reflektáló felületre lehet felvinni az analizálandó mintát, ami annyit jelent, hogy a mintavetőbe kell közvetlenül behelyezni a reflektort. Ha aeroszolókat szeretnénk vizsgálni, akkor nyilván csak impaktoros mintavétel lehetséges, hiszen bármilyen vékony polikarbonát szűrő is megakadályozná a hordozón a röntgensugárzás totális reflexióját. A May-rendszerű kaszkádimpaktor alkalmas mintavetőnek bizonyult, mivel az egyes fokozatokban nem okoz különösebb mechanikai nehézséget elhelyezni egy 300 μm vastagságú szilíciumlapkát. A hétfokozatú May-impaktor 6. és 7. fokozatán csak a mikronnál kisebb aeroszol részecskék impaktálódnak, így a totális reflexiót nem zavarják. A becsapódott részecskék 300 μm széles sávot alkotnak, ami a TXRF-NEXAFS mérésekhez ideális mintának bizonyult, hiszen a totálreflexiós beesési szög miatt a nyaláb által megvilágított mintaterület 300 $\mu\text{m} \times 2 \text{ cm}$.

A szinkrotron-tárológyűrűből kilépő sugárzás számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik, nemcsak rendkívül fényes, de energiája hangolható, és a nyaláb kis divergenciája miatt meghatározott irányban igen kicsi a mintáról a detektorba érkező rugalmasan szórt fotonok száma, ami a méréseinkben kis háttérrel eredményez.

A BESSY II szinkrotron (Berlin) PGM nyalábcatornája egy undulátorra (kis amplitúdójú periodikus mágneses eltérítő egységek) települt, és rendkívül intenzív röntgensugár-forrás a lágyröntgen-tartományban ($< 2 \text{ keV}$). Tipikus intenzitásértékek 200 mA tárológyűrű-áram mellett $6,0 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$ 400 eV-nál és $6,0 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ 1700 eV-nál. Az általunk használt monokromatikus nyaláb energiafelbontása $E/\Delta E \sim 9000\text{--}10000$.

A méréseket fluoreszcens módban végeztük, mivel nincs mód a nitrogén K energiáján a minta hátulját jelentő reflektor átvilágítására. A gerjesztő energiát 125 meV-tal léptettük. A totálreflexióban a spektrális információt lerontó szórás eredetű háttér rendkívül alacsony, a detektor térszöge maximális, így lehetőség van jelentősen csökkenteni a legkisebb kimutatható mennyiséget a nyalábban. A mérési elrendezés sematikus képét mutatja az 1. ábra.

Az abszorpciós spektrum felvétele úgy történt, hogy minden energiapontban a N K α - és K β -vonalának intenzitását a fluoreszcens spektrumból ablakmódszerrel határoztuk meg.



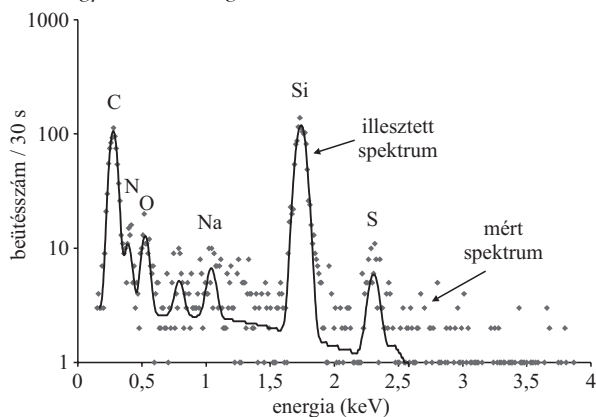
2. ábra. A nitrogén K-vonalánál mért NEXAFS spektrum Szatmárcsén vett aeroszolmintában, 1–2 μm -es aeroszolfrakció

Nitrogénkomponensek a tengeri és szárazföldi aeroszolokban

Mivel célunk a másodlagos aeroszolok keletkezésének vizsgálata, több földrajzi területen vettünk mintát, egyrészt kontinentális háttérnek számító területen, másrészt tengerek közelében. A kontinentális mintát ipari területektől, vagyis az elsődleges forrásoktól mintegy 50–100 km-re fekvő területen (Felső-Tisza-vidéken) vettük. A 2. ábrán egy ismeretlen minta és két standard TXRF-NEXAFS spektrumát mutatjuk be. Az egyes komponensek részarányát NH_4^+ - és NO_3^- -tartalmú sztenderdek spektrumának lineáris kombinációval határoztuk meg. A mérésekből megállapítottuk, hogy az 5. fokozaton 1–2 μm átmérővel rendelkező részecskék nitrogénkomponense túlnyomórészt nitrát, ami a fosszilis tüzelésből vagy közlekedésből származik.

A reziduumban a 399,3 eV-nál megjelenő csúcs a szerves nitrogénvegyületek jelenlétére utal. Ezt támasztják alá az alacsony rendszámú elemek mérésére alkalmas vékonyablakos röntgendetektorral felszerelt pásztázó elektronmikroszkóppal mért röntgenspektrumok, melyekben a nem ammónium-szulfát típusú nitrogéntartalmú részecskék mindig nagy széntartalom mellett voltak csak megfigyelhetők. Tipikus ilyen EPMA-spektrumot mutatunk be a 3. ábrán.

3. ábra. Tipikus nagy széntartalmú aeroszol részecske EPMA-spektruma 10 kV gyorsítófeszültségen



2. táblázat

Szinkrotronos mérések eredménye tengeri és kontinentális aeroszolk nátrium- és nitrogénkomponenseire

	Impaktor- lemez	TXRF		TXRF-NEXAFS	
		Nettó röntgenintenzitás (O = 1000)		Nitrogénkomponensek (összes N százalékában)	
		N	Na	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Ross-tenger	7	30,8	226,5	94	6
	6	4,8	955,0	90	10
	5	4,0	3037,5	45	55
Földközi-tenger	7	17,9	265,5	90	10
	6	12,6	425,7	90	10
	5	4,5	1620,3	10	90
Magyarországi háttér	7	80,9	41,0	100	0
	6	32,5	200,7	95	5
	5	3,5	711,4	15	85

ipari területeken, ahol a nitrogén-oxidok (gázok) koncentrációja magasabb, mint a háttérben, az ott áthaladó tengeri eredetű légtömegekben az alkáli-halogenid sók egy része nitráttá átalakul. Ázsiai aeroszokban néhány részecske elemösszetétele alapján már feltételezték, hogy a halogén-nitrátok tengeri só átalakulásával keletkeztek [5], erre általános következtetést azonban csak az antarktisi minták eredményeiből lehet levonni.

Összefoglalva megállapítható, hogy a TXRF-NEXAFS módszerrel a fosszilis tüzelésből, illetve közlekedésből származó aeroszokban a nitrogénkomponensek aránya a gázméréshez hasonló időfelbontással meghatározható,

A különböző méretfrakciók NEXAFS analízise a várokozásnak megfelelő eredményt adta, a 6. és 7. lemezen (0,5, illetve 0,25 µm) lényegesen nagyobb volt az ammónium aránya a nagyobb méretfrakciókhoz képest.

A fent leírt roncsolásmentes módszer olyan földrajzi területen vett mintából is lehetővé teszi az aeroszolk frakcionált nitrogénanalízisét, ahol az aeroszolkoncentráció nagyon alacsony (pl. sarkvidékek), vagy igen nagy időfelbontású levegőkémiai információra van szükségünk. Ipari és lakott területektől több ezer km távolságban azonban más aeroszolképzési mechanizmusok miatt a nitrogénkomponensek aránya jelentősen eltérhet a kontinentális típustól. Olasz kutatók segítségével hozzájutunk az antarktisi Ross-tenger partjától néhány km-re May-impaktorral vett aeroszolkmintákhoz. A városi és ipari csóvaktól nagy távolságra, az óceánok és tengerek felett a tengervízből tipikus (Na,Mg)Cl és más halogenid-típusú részecskék keletkeznek. A részecskék jellemző átmérője 1–2 µm közötti. Ez a méretfrakció a kontinentstól távol mindössze 55%-ban tartalmaz nitrátot, míg a Földközi-tenger mentén ezen részecskEFRakcióban, mely a legtöbb nátriumot is tartalmazza, a nitrogénkomponensek 90%-a nitrát (2. táblázat). Ennek magyarázata a következő: az

illetve sarkvidéki háttérterületeken, ahol az aeroszolkoncentráció nagyságrendekkel alacsonyabb, akár néhány perces mintavételből analízis végezhető. Megjegyezzük, hogy az alkalmazott módszerrel számos más kis koncentrációban előforduló elem, illetve azok különböző mértékben ionizált állapotai kimutatása is lehetséges. Ezért a fenti módszerrel kapott eredmények fontos kiindulópontjai lehetnek környezetvédelmi elemzéseknek.

Irodalom

1. P. FABIAN: *Atmosphäre und Umwelt* – Auf. Berlin, Springer 1989
2. E. MÉSZÁROS, T. BARCZA, A. GELENCSE, J. HLAVAY, GY. KISS, Z. KRIVÁCSY, A. MOLNÁR, K. POLYÁK: *Size distributions of inorganic and organic species in the atmospheric aerosol in Hungary* – J. Aerosol Sci. 28/7(1997) 1163–1175
3. A. LASKIN, M.J. IEDEMA, J.P. COWIN: *Time-Resolved Aerosol Collector for CCSEM/EDX Single-Particle Analysis* – Aerosol Sci. Technol. 37 (2003) 246–260
4. C. STRELL, P. WOBASCHKE, P. KREGSAMER, G. PEPPONI, P. PIANETTA, S. PAHLKE, L. FABRY – Spectrochim. Acta Part B, 56(2001) 2085–2094
5. C.-U. RO, K.-Y. OH, H.-K. KIM, Y.-P. KIM, C.-B. LEE, K.-H. KIM, C.-H. KANG, J. OSÁN, J. DE HOOG, A. WOROBIEC, R. VAN GRIEKEN: *Single particle analysis of aerosols at Cheju Island, Korea, using low-Z electron probe X-ray microanalysis: a direct proof of nitrate formation from sea salts* – Environmental Science and Technology 35 (2001) 4487–4494

NEMKETTŐSRÉTEG-LIPIDEK KETTŐSRÉTEG-SZERKEZETŰ MEMBRÁNOKBAN

– Egy enigmatikus kérdés vizsgálata kisszögű röntgenszórás-mérésekkel

Garab Győző

MTA Szegedi Biológiai Központ

Biológiai membránok – kettősréteg-szerkezet

A biológiai membránok kettősréteg-szerkezetű lipid-membránból és a membránba ágyazott, illetve a membránnal asszociált fehérjékből állnak. A lipid kettősréteg egy nagy plaszticitású kétdimenziós mátrix, amely alkal-

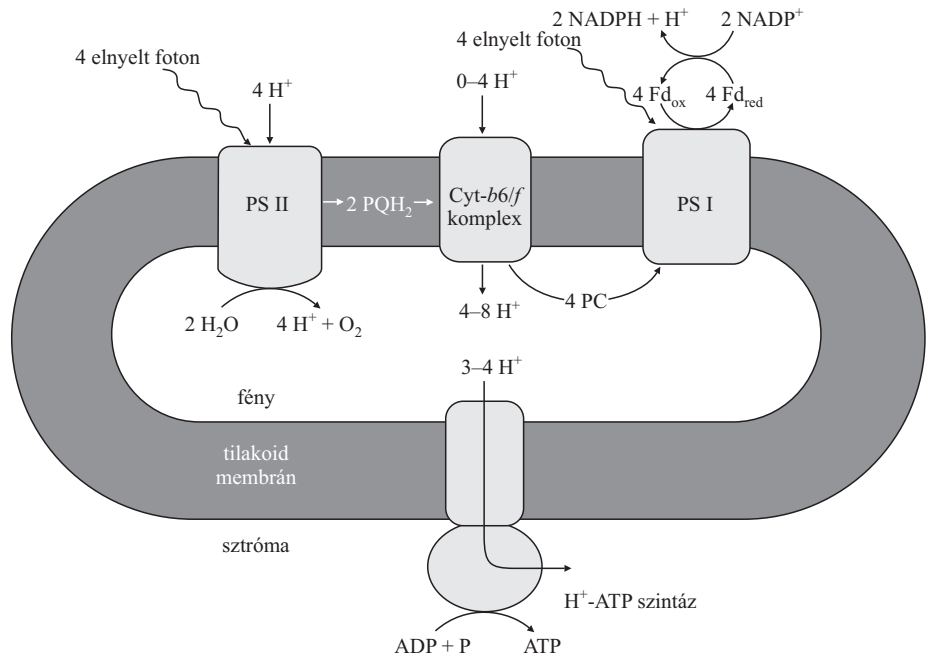
mas arra, hogy két, egymástól elválasztott térrészt hozzon létre. Ezzel a kompartmentalizációval tudja a membrán megvédeni az élő sejtet az élettelen környezettől, ezzel képez a sejtben belül nagyfokú autonómiával rendelkező organellumokat. Ezzel hoz létre az organellumokon belül is zárt membránvezikulumokat, melyek külső és belső ol-

dala között jelentős koncentráció- és potenciálkülönbségek léphetnek fel. A membrán ezen funkciói betöltéséhez elengedhetetlen a lipid kettősréteg azon sajátága, hogy a kettősréteg legtöbb ionra és molekulára impermeábilis, illetve hogy rendkívül jó elektromos szigetelő, továbbá magas elektromos terek megtartására is képes [1].

A kettősréteg fizikai sajátosságai különösen fontosak az energiaátalakító membránok esetén, amelyek működésének kulcsfontosságú lépése, az úgynevezett energizált állapot, egy elektrokémiai potenciálgradiens felépülése. (Az energiaátalakító membránok körébe tartoznak a fotoszintetikus, a mitokondriális, illetve légzést végző és a (bakterio)rodopszint tartalmazó membránok.) Az energizált állapot kialakulása zárt membránvezikulákban, például a fotoszintetikus membránokban, így a kloroplasztisz tilakoid membránjai esetén is – a fényindukált töltésváltásnak és az azt követő „vektoriális” redox reakcióknak köszönhetően – mintegy 10^5 V cm^{-1} elektromos tér ($\Delta\psi$) és a 2–3 pH értéknyi protongradiens (ΔpH) felépülését jelenti a belső és a külső vizes fázis között (1. ábra). Az így kialakuló protonmotoros erő, azaz a protonokra vonatkoztatott elektrokémiai potenciálgradiens, $\Delta\mu_{\text{H}^+} = \Delta\psi - (RT/F)\Delta pH$, az ATP szintézisben hasznosul [2]. (A jó elektromos szigetelés és az impermeabilitás nem energiaátalakító membránok működésében is fontos, bár talán kevésbé evidens.)

Kettősréteg- és nemkettősréteg-lipidek mint membránalkotók

A biológiai membránok fizikai tulajdonságai szempontjából különösen fontos az a tény, hogy a lipidek – az úgynevezett nemkettősréteg-lipidek kivételével – kettősrétegképzésre hajlamosak: vizes közegben már mintegy 10^{-11} M koncentrációnál tökéletes kettősréteg-szerkezetet képesek alkotni. Ezzel szemben az úgynevezett nemkettősréteg- (vagy nem lamellaképző) lipidek hasonló körülmények között és általában a fiziológiailag érdekes viszonyok mellett (pH, ionerősség, hőmérséklet stb.) kettősréteg-struktúra felvételére nem képesek, attól lényegesen eltérő szerkezeteket alkotnak [1, 3]. Mindezek alapján joggal tételezhetnénk fel, hogy a biológiai membránokban, de legalábbis az energiaátalakító membránokban nem lamellaképző lipidek nem, vagy csak igen alacsony koncentrációban fordulnak elő. Ezzel szemben az igazság az, hogy ezek valamennyi biológiai membránban jelen vannak, és – minden várakozásra rációvalva – legnagyobb mennyiségben éppenséggel



1. ábra. A kloroplasztisz tilakoid membránjának sematikus ábrája. A kettősréteg-szerkezetű membránban ágyazott proteinkomplex-komponensek végzik a fényelnyelést, a gerjesztési energia továbbítását a reakciócentrumokba, ahol az elsődleges töltésváltás történik; az ezt követő töltézállító (redox) folyamatok vezetnek el a primér termékekhez, az O_2 és a (redukáló erőt a szervesanyag-produkcióhoz biztosító) NADPH_2 -höz, valamint a vezikulum úgynevezett energizált állapotához (μ_{H^+}), amely az ATP szintézis során hasznosul.

az energiaátalakító membránokban találhatók. Ezekben az egymástól lipid- és fehérje-összetételben, pontos funkcióikban és morfológiailag is eltérő energiaátalakító membránokban közös, hogy a teljes lipidmennyiség mintegy fele hordozza ezt a (biológiai membránok szempontjából) különleges, nem lamellaképző, fizikai sajátást. Ezzel a membrán teljes lipidmennyisége erősen nemlamelláris hajlamúvá válik. Jóllehet egyes nem lamellaképző lipidek számos, speciális funkciót elláthatnak (pl. szerepet vállalhatnak a membránfúzióban, egyes fehérjék mikrokozmeté- nek biztosításában stb. [4]), semmi nem indokolja, hogy a membrán lipidtartalmának mintegy fele nemkettősréteg-lipid legyen, hiszen igaz az is, hogy ugyanezek a membránok nemlamelláris szerkezetet számottevő méretekben nem alakítanak ki, és ha mégis, akkor is csak tranzien- t módon [4, 5]. Ez a kérdés ezért az energiaátalakító membránok és általában biológiai membránok szerveződésének és funkciójának fontos, máig megoldatlan kérdése.

Az ezen a területen folyó (a kérdéskör általános jelentőségéhez képest talán nem is túl intenzív, de a probléma enigmatikus voltához képest mégis jelentős erővel folyó) kutatások több rész kérdés megválaszolására irányulnak. Ezek közül itt két probléma vázlatos ismertetésére vállalkozom: i) hogyan épülnek be ezek a molekulák kettősréteg-membránokba, és ii) milyen univerzális szerkezeti/funkcionális szerepet töltenek/tölthetnek be ezek a kémiailag különböző molekulák különböző biomembránokban? Az első kérdésre kloroplasztisz-tilakoid-membránból izolált rendszeren kísérletekkel, köztük szinkrotronsugárzást használó kisszögű röntgenszórás- (SAXS)-mérésekkel, kerestük a választ, és fotoszintetikus membránokon elsőként sikerült bizonyítani, hogy ezek a lipidek proteinek aggregációja révén „kényszeríthetők” a kettősréteg-szerke-

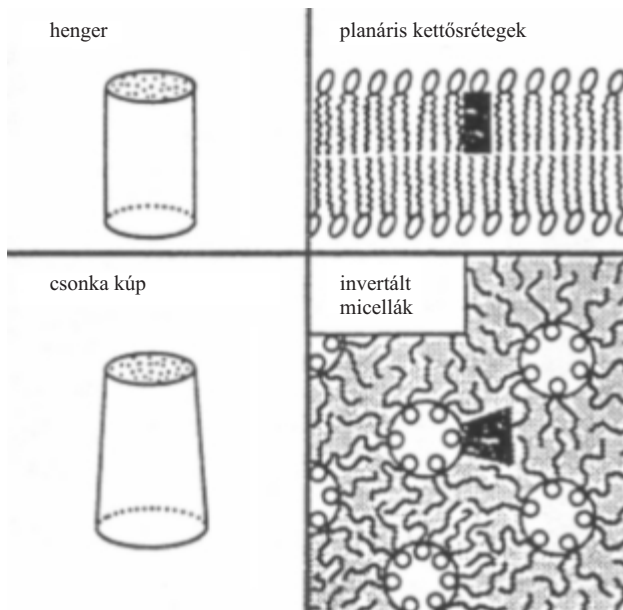
zet felvételére [6]. Ezek a vizsgálati eredmények vezettek el bennünket ahhoz a magyarázathoz, ami szerint a nem-kettősréteg-lipidek nagy koncentrációban való jelenlétével állítja be és szabályozza a membrán a magas proteinkoncentrációját, illetve tartja közel állandó szinten a protein:lipid arányát [7]. Hipotézist állítottunk fel továbbá arra, hogy a lipidek nem lamellaképző hajlama miként kölcsönözhet, korábban nem ismert módon, szerkezeti flexibilitást a biológiai membránoknak.

Nemlamelláris szerkezetek

A nemkettősréteg-lipidek – ellentétben a jó közelítéssel henger alakú lamellaképző lipidekkel – leginkább csonka kúp alakkal közelíthetők. Ennek oka lehet például az, hogy a fejcsoport viszonylag kicsiny átmérőjű a zsírsavlánc „lábakhoz” képest. Ez jól érzékelhető a kloroplasztiszok két fő lipidkomponense, az MGDG (monogalaktozil-diacilglicerid), és a DGDG (digalaktozil-diacilglicerid) példájával, amelyek kémiai szerkezetüket illetően csak a fejcsoport méretében (mono, illetve di) térnek el egymástól; ez a két galaktolipid összességében mintegy 80%-át (50% + 30%) teszi ki a tilakoid-membránok lipid-tartalmának. Az eltérő molekuláris geometria miatt tehát míg a DGDG kettősréteget képez, hasonló körülmények között az MGDG úgynevezett invertált hexagonális, H_{II} szerkezetet vesz fel. Ezt a szerkezetet mutatja be a 2. ábra. (Részletesebb tárgyalásra lásd pl. [3]).

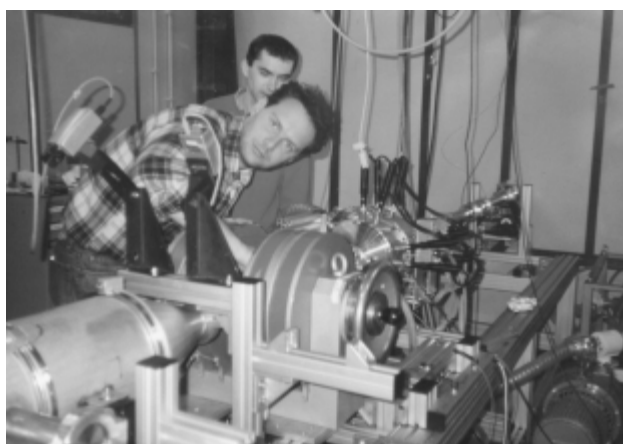
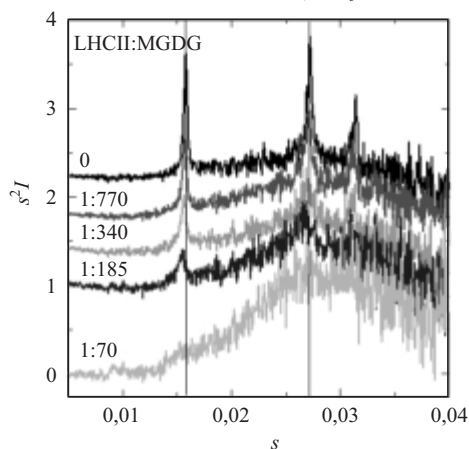
A lamelláris és a H_{II} -es szerkezet viszonylag könnyen azonosítható SAXS segítségével (sajnos ugyanez nem igaz a köbös struktúrákra). Ezen mérések előnye más – például elektronmikroszkópos – módszerekhez képest, hogy a minta lényegében minden különösebb preparatív előkészítés nélkül vizsgálható, így az esetleges műtermékek és esetleges preparációs fázisátmenetek elkerülhetők. Ezzel a módszerrel tehát a lipidek fizikai állapota – vagy annak jól meghatározott állapotai és ezek közötti szerkezeti átrendeződések – könnyen követhetők.

3. ábra. A kloroplasztisz-tilakoid-membrán fő lipidkomponensének, a nem lamellaképző lipid MGDG, kisszögű röntgenszórás-képe és annak módosulása a növények fő, fénybegyűjtő klorofill a/b „antenna” komplexének (LHCII) hozzáadásával. Érdekes megjegyezni, hogy ez a két komponens a bioszféra legnagyobb mennyiségben előforduló lipidje, illetve proteinkomplexe. Az LHCII:MGDG moláris arány 70-es értékénél mért szórásprofil már nagyon hasonlít a kloroplasztisz-tilakoid membránjain mérthez, amely lamelláris szerkezettel értelmezhető (balra). A Triesti Elettra Szinkrotron SAXS mérőállomása – a nyalábra helyezett elektromágnes a tilakoid-membránok rendezésére szolgál. A felvételen a mérőállomás munkatársa, Heinz Amenitsch és munkatársam Jávorfői Tamás (háttérben) a mérés konfigurálása közben (jobbra).



2. ábra. A henger alakúnak tekinthető és ezért vizes közegben (illetve a fiziológiailag érdekes tartományokban) spontán kettősréteg- (lamelláris) szerkezetet felvevő és csonka kúp alakú, nem lamellaképző lipidek, amelyek invertált hexagonális (vagy köbös) szerkezetek felvételét preferálják.

Amint azt a 3. ábra mutatja, a tilakoid-membránokból izolált MGDG a H_{II} -es fázisra jellemző „ujjlenyomatot” adta. Ezt az LHCII, a kloroplasztisz fő, klorofill a/b fénybegyűjtő proteinkomplex komponensének hozzáadásával el lehetett nyomni, és a H_{II} -es fázist, az LHCII fokozatos hozzáadásával párhuzamosan, felváltotta egy a lamelláris fázis jelenlétével konzisztens szórás jel. Ezek az adatok – több más, spektroszkópiai és elektronmikroszkópos mérési eredménnyel együtt – arra engedtek következtetni, hogy a H_{II} -es fázist a lipideknek az LHCII rendezett makroaggregátumba való beépülése lebontja, illetve hogy az MGDG-t az LHCII aggregációja kényszeríti a kettősréteg-szerkezet felvételére. Vizsgálataink – elsősorban a SAXS és az LHCII:MGDG lamelláris aggregátumok ne-

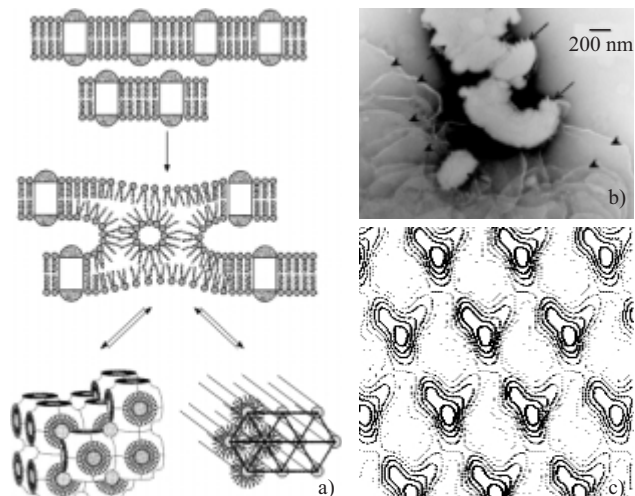


gativ festésű elektronmikroszkópiai mérések – azt is feltárták, hogy ebben a mesterséges membránban a lamelláris szerkezeten belüli magas proteinkoncentráció, illetve a proteinek szabályos, szoros elrendeződése kizárja a H_{II}-es fázis jelenlétét [6]. SAXS segítségével ugyanis mérhető a H_{II} szerkezet mérete, míg az elektronmikroszkópos felvételek részletes analízise kijelöli a periodikus szerkezetben lipidek számára rendelkezésre álló térrészt. Valószínűleg ugyanilyen alapon kizárható a H_{II} fázis tilakoid-membránba ágyazódása is, illetve ennek a fázisnak az előfordulása más, hasonlóan magas proteinkoncentrációjú, energiaátalakító membránokban. Ezekben a membránokban ugyanis szintén magas a proteinkoncentráció, és – amint azt például a gránumos tilakoidok esetére ismert [7, 8] munkák mutatják – a proteinek „sűrű”, hosszú távon rendezett struktúrákat alkotnak.

A nemkettősréteg-lipidek szabályozó szerepe

Az LHCII:MGDG lamellák képződését továbbgondolva arra is választ kaptunk, mi lehet a nem lamellaképző lipideknek az az általános sajátja, amely előnyös a biológiai funkció szempontjából. A válaszuk az, hogy – kissé paradox módon – szegregációs képességük teszi őket értékesekké. Bár ezek a lipidek is beépülhetnek a kettősrétegbe, pontosabban: az ilyen lipideket tartalmazó elegy is kényszeríthető kettősréteg felvételére, de ez erősen korlátozott, és amikor a lipidek „főlős” mennyiségben vannak jelen, nagyon könnyen szegregálódnak a membránból. Ezzel tehát a lipidek – nemlamelláris hajlamuknak köszönhetően – meg tudják akadályozni azt, hogy a membrán „kihíguljon” [9]. A kettősréteg, azaz lamellaképző lipidek erre nyilvánvalóan nem képesek, hiszen ezek proteinek távollétében is stabilis kettősréteget alkotnak. Ugyanakkor ismert, de legalábbis feltételezhető, hogy a membránokban nagyon fontosak a kooperatív kölcsönhatások. Bár erről ma még viszonylag keveset tudunk, ezek nélkül például az energiaátalakítás hatékonysága valószínűleg nem lenne biztosítható [10]. Így tehát a nem lamellaképző lipidek szegregációs képességük révén egy önszabályozó mechanizmus kulcsfontosságú elemei. Irodalmi adatok elemzése azt is megmutatta, hogy – ahogy a magyarázat alapján várjuk – szoros összefüggés van különböző biológiai membránok nemkettősréteg-lipidkoncentrációja és proteintartalma között. Ez tehát azt jelenti, hogy a kettősréteg-szerkezetű membrán lipid:protein aránya nemkettősréteg-lipidekkel állítható be és azzal szabályozható [9].

Mindezek alapján az is erősen valószínűsíthető, hogy – amint arra az MGDG:LHCII rendszer viselkedése is utalt – a membrán, illetve annak lamelláris lipidfázisa és a „kívül rekedt”, vagy bármi más módon „feleslegessé” vált lipid-mennyiség dinamikus egyensúlyt alakít ki egymással (4. ábra). Feltételezhető ugyanis, hogy a szegregált lipidek a kettősréteg-szerkezetű membrán közelségében maradnak és/vagy azzal szorosan asszociálódnak. Ezzel ki- és belépésük a biológiai funkciónak megfelelően „hangolható”. Ez a membránok flexibilitásának és szerkezeti dinamikájuknak egy korábban nem ismert fontos eleme lehet [9]. Ennek a hipotézisnek az ellenőrzése/finomítása további



4. ábra. Rendezett aggregátumokat tartalmazó membrán sematikus képe (a): amennyiben a membránban (pl. belső szerkezeti átrendeződést követően) szabad lipidfelületek alakulnak ki, ezek szegregálódhatnak és nemlamelláris, köbös vagy invertált hexagonális szerkezeteket hoznak létre; a folyamat megfordítható, azaz protein hozzáadásával ezeket a lipideket a membrán felveheti (a). Ez utóbbi folyamat érzékelhető az elektronmikroszkópos felvételen, amely a H_{II} fázisú lipidek (L) membránba (M) épülését mutatja (b). Az MGDG:LHCII kettősréteg-szerkezetű mesterséges membránban a proteinek jól meghatározott (bár szerkezetileg flexibilis) membránba vannak beágyazva. Az ábra a szerkezet Fourier-térképét mutatja (az ábrázolt terület hozzávetőlegesen 20 × 20 nm nagyságú) (c).

vizsgálatok tárgya, melyben a szerkezetvizsgálat szinkrotronoknál elérhető hatékony és gyors SAXS-mérések és – itt nem tárgyalt – más, szintén szinkrotronsugárzást használó módszerei (pl. lipid-monolayerek reflektivitásmérései, multilayerek szórás tulajdonságai, periodikus proteinszerkezetek dinamikus sajátosságai, röntgen-mikroszkópia), kiegészítve más biokémiai és biofizikai technikákkal jelentős segítséget adhatnak.

Irodalom:

1. E. SACKMANN: *Biological membranes architecture and function* – Handbook of Biological Physics Vol. I: Structure and Dynamics of Membranes (eds.: R. Lipowsky, E. Sackmann) Elsevier, Amsterdam (1995) 1
2. D.G. NICHOLSON, S.J. FERGUSON: *Bioenergetics 2* – Academic Press, London, 1992
3. J.M. SEDDON, R.H. TEMPLER: *Polymorphism of lipid-water systems* – Handbook of Biological Physics Vol. I: Structure and Dynamics of Membranes (eds.: R. Lipowsky, E. Sackmann) Elsevier, Amsterdam (1995) 97
4. R.M. EPAND: *Lipid polymorphism and protein-lipid interactions* – Biochim. Biophys. Acta 1376 (1998) 353
5. W.P. WILLIAMS: *The physical properties of thylakoid membrane lipids and their relation to photosynthesis* – Lipids in Photosynthesis: Structure, Function and Genetics (eds.: P.-A. Siegenthaler, N. Murata) Kluwer Academic Publishers (1998) 103
6. I. SIMIDJIEV, S.S. STOYLOVA, H. AMENITSCH, T. JÁVORFI, L. MUSTÁRDY, P. LAGNER, A. HOLZENBURG, G. GARAB: *Self-assembly of large, ordered lamellae from non-bilayer lipids and integral membrane proteins in vitro* – Proc. Natl. Acad. Sci. USA 97 (2000) 1473
7. A.V. RUBAN, M. WENTWORTH, A.E. YAKUSHEVSKA, J. ANDERSSON, P.J. LEE, W. KEEGSTRÁ, J.P. DEKKER, E.J. BOEKEMA, S. JANSSON, P. HORTON: *Plants lacking the main light-harvesting complex retain photosystem II macro-organization* – Nature 421 (2003) 648
8. L. MUSTÁRDY, G. GARAB: *Granum revisited. A three-dimensional model – where things fall into place* – Trends Plant Sci. 8 (2003) 117
9. G. GARAB, K. LOHNER, P. LAGNER, T. FARKAS: *Self-regulation of the lipid content of membranes by non-bilayer lipids* – Trends Plant Sci. 5 (2000) 489
10. J. LAVERGNE, P. JOLIOT: *Restricted diffusion in photosynthetic membranes* – Trends Biochem. Sci. 16 (1991) 129

Ahhoz, hogy a mérési eredmények hitelesek és megbízhatóak legyenek, olyan eszközöket kell a mérés során alkalmazni, amelyekkel a mérés megismételhető, paraméterei időben nem változnak. Így ha szeretnénk egy mérést megismételni, akkor ne kelljen a mérőeszközt mindig kalibrálni, vagy ha mégis, akkor az automatikusan történjen. Fontos mindemellett az is, hogy valós időben kell beavatkozni a kísérleti körülmények feltételeinek megadása és megtartása tekintetében is. Ma már a mérési kiértékelés folyamata stochasztikus és valós idejű (*real-time*) számításokat is követel, elsősorban a visszacsatolási ágakban a kísérleti körülmények feltételeinek megtartása érdekében.

Számos fontos tény fel lehetne sorolni előljáróban a digitális jelfeldolgozási (*Digital Signal Processing*, DSP) technológia jelenlétének az igazolására a mérés technikában. A cikkben kerülöm az egzakt matematikai tárgyalást, közkedvelt problémákon keresztül igyekszem a digitális jelfeldolgozás problémakörét szemléltetni. Megpróbálom körbejárni a ma már óriási irodalommal rendelkező digitális jelfeldolgozást, amely az utóbbi évek egyik leggyorsabban fejlődő tudományága, és mondhatjuk, hogy nincs olyan tudományterület, amelyet nem érint, sőt ma már a mindennapi életben is szerephez jut. Igyekszem olyan problémán keresztül megközelíteni a témát, amely a mai, fizikával foglalkozó és a fizika kutatásában résztvevőket is érdekelhet, ez pedig a valóság hű zenei reprodukció kérdése.

Bevezető

Digitális jelfeldolgozó rendszereket ma nagyon sok helyen alkalmaznak, így többek között a mérőjel-előkészítő eszközökben és a beavatkozó rendszerekben. A mérő és beavatkozó analóg rendszerek sematikus ábrázolását az *1.a ábra*, míg az ennek megfelelő digitális rendszert az *1.b ábra* szemlélteti.

Az analóg jelfeldolgozó rendszer (*1.a ábra*) műveleti erősítőt (op) és impedanciákat tartalmaz (Z_1 és Z_2). A digitális jelfeldolgozó rendszer (*1.b ábra*), analóg–digitális (AD) átalakítót tartalmaz, amelyik elvégzi a mintavételezést, majd a jelminta digitalizálását. Tartalmaz digitális jelfeldolgozó rendszert (DSP) és digitális–analóg (DA) átalakítót, amelyik a digitális számsort rekonstruálja analóg jellé. Ahhoz, hogy az analóg jeleket digitális eszközzel fel tudjuk dolgozni, először digitális jellé kell alakítani azokat.

Feltehetnénk a kérdést, hol alkalmazzák ma a DSP-technikát. Egyszerűbb volna a válasz, ha az volna a kérdés: hol nem? Ma a fejlett technikának nincs olyan területe és eszköze, ahol ne volna beépítve legalább egy DSP-processzor, vagy olyan eszköz, amellyel DSP-számítások

kat lehet végezni (*Field Programmable Gate Array*, FPGA, *Complex Programmable Logic Device*, CPLD), vagy más gyors, de nem DSP-alkalmazásra fejlesztett processzor. A DSP-eszközök ma már nem drágák, különösen, ha azt vesszük figyelembe, hogy milyen viszonyban van a processzor ára és a megvalósított eszköz értéke.

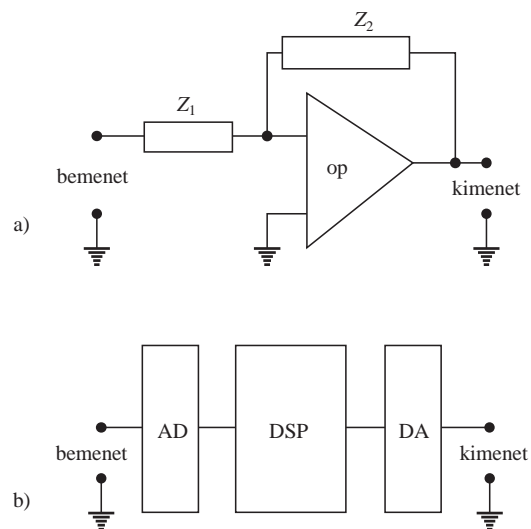
Ahhoz, hogy megértsük a DSP-technika jelentőségét, meg kell értenünk, mi a jelfeldolgozás, és miért jobb a digitális jelfeldolgozás, mint az analóg. Ehhez pedig egy népszerű problémát választottam a zenei hang feldolgozásának a problémaköréből. Itt könnyen magyarázható a jel-mintavételezés, a jelfeldolgozás, a beavatkozási mechanizmusok, valamint a jelrekonstrukció problémaköre is. A hangfeldolgozás problémaköre mellett a rendszerátalánosítást is elvégzem, megmutatva a jelentkező különbségeket.

A DSP-rendszereket ma már majdnem mindenhol alkalmazzák, különösen jelentős a használatuk a laboratóriumi mérőeszközök területén, mind többet alkalmazzák az orvosi műszerekben, multimédiás és zene-eszközökben, a számítógépekben (*modemek, hubok, routerek, CD, me-revlemez-, floppy-meghajtó stb.*), elektronikus játékokban, mobiltelefon-hálózatokban, villanymotor vezérlésére, a nagy értékű autókban stb.

Matematikai műveletek a DSP-technikában. Differenciaegyenletek és -egyenletrendszerek megoldása

Analóg rendszerek számítása (pl. konvolúciószámítás), valamint a jel Fourier-transzformáltjának meghatározása általános esetben nagyon összetett feladat és csak speciális esetben oldható meg. Az analóg rendszerek fontos, megkerülhetetlen hátránya, hogy paramétereik időben változnak, nem egyértelműen reprodukálhatók, öregsznek, nagy a paraméterszórás az elemeken belül, hőmérsékletfüggők, nem programozhatók (a *Field-Programmable Analog Array*, FPAÁ áramköröket kivéve), bonyolult a rendszer toleranciaszámítása stb.

1. ábra. Az a) analóg és b) digitális feldolgozó rendszer sematikus ábrázolása



A jeleket vagy magát a rendszer valamelyik paramétereit az analóg tartományban leíró, kiinduló kifejezések differenciálegyenletek, integrálok vagy integrálegyenletek. A diszkrét tartományba történő átalakítás után ezek a kifejezések differenciaegyenletté alakulnak át. Így egy általános digitális szűrőt az (1) kifejezés írja le. Ezeket az általános szűrőket úgynevezett IIR-szűrőknek (*Infinite Impulse Response*, végtelen impulzusválaszú szűrő) nevezzük. Ez a szűrőtípus két főrészből áll: az első tagból, amelyben a b_k együtthatók és a bemenő jelelminták $x(k)$ értékei szerepelnek, továbbá a második tag a visszacsatolt rész, amelyben az a_k együtthatókat, valamint a kimenő jelelminták $y(k)$ értékeit tartalmazza. Az IIR-szűrők rendje, M és N , az alkalmazásoktól függően maximum tízes nagyságrendű:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^N a_k y(n-k). \quad (1)$$

Abban az esetben, ha az a_k együtthatók értéke nulla, azaz nincs visszacsatoló tag, úgynevezett FIR-szűrőket kapunk (*Finite Impulse Response*, véges impulzusválaszú szűrő). A FIR-szűrők rendje egy-két nagyságrenddel nagyobb hasonló amplitúdójelleg mellett, mint az előbb említett IIR-szűrőké. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a FIR-szűrők fázismentese lineáris, szemben az IIR-szűrők nemlineáris fázismentésével. A linearitás akkor nagyon fontos, ha a jelalakítás követelmény a szűrés után is. Ma már vannak lineáris fázissal rendelkező IIR-szűrők is, de külön megkötevéseket alkalmaznak a tervezésük során.

A diszkrét Fourier-transzformáció (DFT) együtthatóinak számítása a következő kifejezés szerint történik:

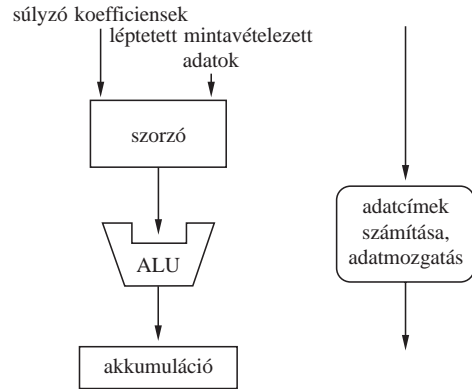
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, K-1 \quad (2)$$

Ha ezt a kifejezést alkalmaznánk, akkor egy négyezer mintás idősor esetén ($N = K = 4000$) $16 \cdot 10^6$ komplex szorzást és összeadást, vagyis egy spektrális komponens kiszámításához nyolcezer komplex számítás műveletet kellene elvégezni. Ha valós idejű számítást végzünk, akkor egy 2 GFlops teljesítményű DSP-processzor csak egy 60 kHz határfrekvenciájú jelet tudna analizálni. Ha ilyen nagy kapacitású processzort ilyen kis határfrekvenciájú jelet analízisre alkalmaznánk, az nagy pazarlás lenne. A jelfeldolgozással foglalkozó szakemberek rájöttek, hogy megfelelő átcsoportosítással, a trigonometrikus kifejezések ciklikusságát kihasználva, egy sokkal kisebb számú matematikai műveletet nyernek, és ezt az eljárást FFT-nek (*Fast Fourier Transformation* = gyors Fourier-transzformáció) nevezzük. Az FFT hatását a későbbiekben példán keresztül szemléltetjük.

Ahogy a két előző kifejezésből látható, a következő számítási műveleteket kell elvégezni ciklikusan:

- Szorozd össze a súlyzó együtthatókat a sorban álló jelelmintával,
- add az előző értékhez a szorzatot,
- majd mozgasd a bejövő és kimenő adatokat adott címre,
- közben számítsd ki az új címeket egy adott algoritmus alapján.

¹ 1 Giga floating point operations per sec = 1 milliárd lebegőpontos művelet másodpercenként



2. ábra. A jelfeldolgozás folyamán jelentkező műveletek szemléltetése

Mindent annyiszor, ahányadrendű az összeg. Ezt a folyamatot a 2. ábrával szemléltethetjük.

A 2. ábrán mutatott szerkezet alapján megtervezett DSP-processzor egyetlen ciklus alatt képes elvégezni ezt a műveletsort. Eszerint, ha a processzor órajele 300 MHz, akkor akár 2 GFlops teljesítményre is képes.

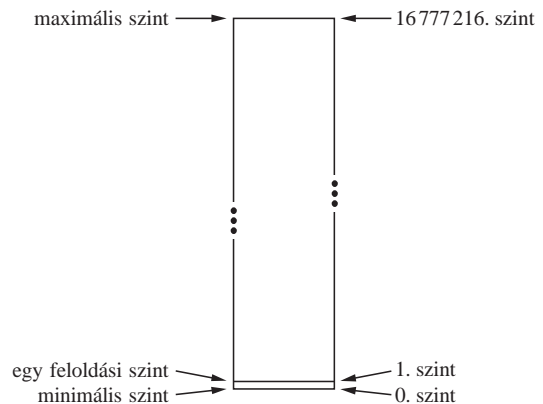
Mintavételezési tétel és anomáliák. AD és DA konverzió problémái. Jelrekonstrukció

A jelfeldolgozásban ma nagy a választási lehetőség a megfelelő AD (analog-digitalis) és DA (digitalis-analog) átalakítók gyártási technológiája, bitfeloldása és mintavételezési sebessége tekintetében. A mai átalakítók sebessége akár az 1 Tminta/s is lehet, a bitfeloldás pedig 32 bit/minta értéknél is nagyobb lehet.

Ma léteznek olcsó, nagy feloldású (pl. 24 bites) AD-konverterek, ezek az úgynevezett $\Delta\Sigma$ -átalakítók családjába tartoznak. Ezeket elsősorban zenei jelek digitalizálására fejlesztették ki, de másra is alkalmazhatók. A 24 bites feloldás szemléltetéséhez segítségül a távolságmérés pontosságának analógiáját hívhatjuk. Ez megfelel annak, mintha közel 17 km távolságot 1 mm pontossággal mérnénk. A 3. ábrán és a táblázatban szemléltetünk még néhány érdekes fizikai jelenséget, amelyeket gyakran mérnek ilyen felbontással.

A jelek mintavételezésekor fontos a mintavételezési sebesség megválasztása. A mintavételezési tétel kimondja, hogy a mintavételezési sebességnek legalább kétszer akkora kell lennie, mint a mintavételezett jel határfrekvenciája. Az általánosan elfogadott arány tíz.

3. ábra. A 24 bites feloldás szemléltetése



táblázat		
A 24 bites feloldás néhány felhasználása, jellemzői		
alkalmazási terület	mérési tartomány (V)	feloldási szint (V)
agysejtjel elvezetése	-0,15 - 0,15	$17,9 \cdot 10^{-9}$
mechanikai kiegyensúlyozás	-2 - 2	$0,24 \cdot 10^{-6}$
lassú EM-térhatás	μV tartomány	$0,06 \cdot 10^{-12}$

Egy példa arra, mi történik, ha netán ezt az alapvető elvárást nem tartják be. Vegyünk egy összetett periodikus jelet:

$$x(t) = \cos(2\pi t) + \sin(6\pi t) + \cos(12\pi t), \quad (3)$$

és nézzük meg, mi történik, ha a mintavételezési sebessége 5 minta/s és kérdés, hogy az ilyen mintavételezés után hogy néz ki a jel a jelrekonstrukció után.

Ebben a jelben a következő frekvenciakomponensek vannak jelen:

$$F_1 = 1 \text{ Hz}, F_2 = 3 \text{ Hz} \text{ és } F_3 = 6 \text{ Hz},$$

így az elvárt minimális mintavételezési frekvencia legalább $F_s > 2 F_{\max} = 12 \text{ Hz}$. A mi esetünkben a mintavételezési frekvencia $F_s = 5 \text{ Hz}$. Ilyen mintavételezési sebesség mellett a maximálisan megengedett frekvenciakomponens $F = 2,5 \text{ Hz}$. Az így digitalizált jel

$$\begin{aligned} x(n) &= \cos\left(2\pi \frac{1}{5} n\right) + \sin\left(2\pi \frac{3}{5} n\right) + \cos\left(2\pi \frac{6}{5} n\right) = \\ &= 2 \cos\left(2\pi \frac{1}{5} n\right) - \sin\left(2\pi \frac{2}{5} n\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Az $x(t)$ jelben az első jelkomponensnek kisebb a frekvenciája, mint 2,5 Hz, ugyanakkor a másik két jelkomponens nem lehet korrekten mintavételezni, és így jelentkezik a frekvenciaátlapolás (*aliasing*) effektusa, és ezek a frekvenciák (az ún. frekvenciatükörözés következtében) a következő értékeket veszik fel:

$$\begin{aligned} F_2' &= F_2 - F_s = -2 \text{ Hz} & f_2 &= -2/5, \\ F_3' &= F_3 - F_s = 1 \text{ Hz} & f_3 &= 1/5. \end{aligned}$$

A 4. ábra szemlélteti kiinduló mintavételezett $x(t)$ és a mintavételezés analóg képviselőjét, az $y(t)$ jelet. A mintavételezett jel analóg reprezentánsa:

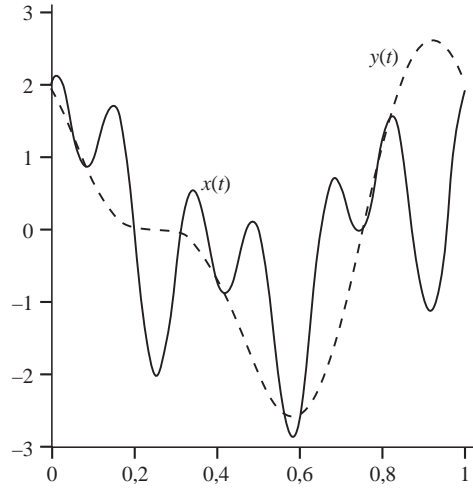
$$y(t) = 2 \cos(2\pi t) - \sin(4\pi t). \quad (5)$$

Ahogy az ábráról látható, az $x(t)$ és az $y(t)$ lényegesen különböznek egymástól, mondhatjuk, hogy a mintavételezett jelnek vajmi kevés köze van a forrásjelhez.

Következésképpen fontos a mintavételezés feltételeire odafigyelni. Legfontosabb a mintavételezést megelőzően korlátozni a mintavételezendő jel sáv szélességét legalább kétszer kisebbre, mint a mintavételezés sebessége. A sáv szélességet az úgynevezett átlapolást gátló (*antialiasing*) szűrővel korlátozzuk.

Mekkora a processzor igény, miért kell speciális (DSP) processzor?

Alapvető kérdés a szükséges processzorkapacitás meghatározása a feldolgozás szemszögéből. Induljunk ki a hangfeldolgozás problémájából. Legyen csatornánként a mintavételezési sebesség 44 kminta/s. A jelalak-hűség nagyon fontos a hangfeldolgozás minősége szempontjából, így a FIR-típusú szűrő szerkezetet választjuk. A választott szűrő differencia-egyenlete legyen 128-ad rendű. Valódi szűrőknél még ez a nagyságrend sem ad kellően nagy szelekciót. Ahhoz, hogy felmérjük a szükséges processzor igényt, számítsuk ki, hány műveletet kell elvégezni egy másod-



4. ábra. A frekvenciaátlapolás hatása az összetett periodikus jelre az időtartományban

perc alatt egy ilyen szűrő esetében. Ha háromutas a hangváltó, akkor háromszor annyi művelet kell elvégezni. Számítsuk ki egyetlen szűrő számítási igényét, a 128-ad rendű FIR-szűrő kifejezéséből kiindulva:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{127} b_k x(n-k). \quad (6)$$

Egyetlen jelminta értékének a kiszámításához a szűrő kimentén 128 szorzásra van szükség. Másodpercenként 44 ezer ilyen mintát kell kiszámítani, vagyis $128 \times 44 \cdot 10^3 = 5632 \cdot 10^6$ szorzást és ugyanennyi összeadást kell elvégezni, de emellett még az összetett adatmozgatást is el kell végezni. Az 5. ábra szemlélteti az adatmozgatás folyamatát.

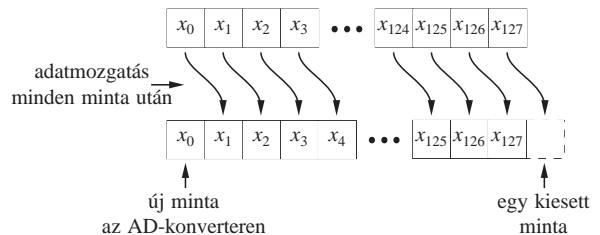
A szükséges adatmozgatások száma egy másodperc alatt $128 \times 44 \cdot 10^3 = 5632 \cdot 10^6$. Mindezt figyelembe véve a műveletek száma egy háromcsatornás hangváltó esetében $50688 \cdot 10^6$ művelet/s. Stereó jel esetében ez kétszer akkora, de különösen megnő a másodpercenkénti műveletszám igénye az új zenei ASE/EBU-szabvány alkalmazásakor, amikor is a mintavételezési sebesség 192 kminta/s.

A számítási igény meghatározható a spektrum kiszámításából kiindulva is, fordított gondolatmenetet követve. Induljunk ki egy 4096 mintát tartalmazó FFT vagy inverz FFT számítási igényéből, és határozzuk meg, hogy egy 2 GFlops-os csúcsprocesszor esetén mekkora az a legnagyobb mintavételezési sebesség, amely mellett folyamatos a spektrum előállítás. A 4096 mintás radix-2 FFT számításához összesen 45060 komplex szorzás és 159778 komplex összeadás szükséges. Tételizzük fel, hogy minden művelet egy gépi ciklus alatt számítható. Ekkor összesen 204838 komplex műveletet kell elvégezni, miközben 4096 mintát mintavételezünk. Esetünkben, amikor online spektrumszámítást akarunk végezni, egy minta vétele alatt közel 50 számítást kell elvégezni. Innen könnyen kiszámítható a maximális mintavételezési sebesség, mégpedig a processzor maximális munkavégzési sebessége és az egy mintára eső számítási idő viszonyából:

$$2 \cdot 10^9 / 50 = 4 \cdot 10^7 \text{ minta/s},$$

amely szerint egy ilyen DSP-processzorral maximálisan egy 20 MHz határfrekvenciájú jel spektrumát lehet kiszámítani online. Látható, hogy az FFT a DFT eljárásához képest sokkal effektívebb, míg a DFT-vel 60 kHz, addig az FFT eljárással 20 MHz határfrekvenciájú jel spektrumát lehet meghatározni.

5. ábra. A mintavételezett jelek mozgatása a feldolgozás folyamán



Adódik a kérdés: miként lehet digitálisan feldolgozni a fizikában jelentkező, sokkal nagyobb határfrekvenciájú jeleket? Két lehetőség van: vagy közvetve, vagy nagy összetettségű FPGA logikai áramkörök alkalmazásával, amelyek révén célprocesszorokat lehet létrehozni. Ezek műveleti sebessége ma akár 2 TFlops fölött is lehet. Ha párhuzamosítják az ilyen rendszereket, és megfelelően szinkronizálják azokat, a számításokat még jobban fel lehet gyorsítani. Mindezt fokozva, hol a határ?

Digitális számítógépek

A számítógépek felépítésében két alapvető alkalmaznak ma, a memória és a buszok kapcsolatát tekintve. Ezek a Harvard-szerkezet és a Neumann-szerkezet.

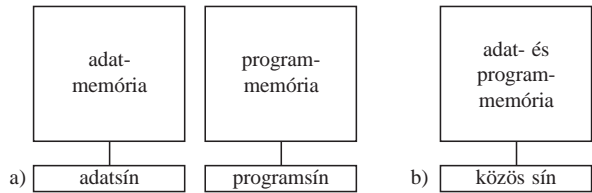
A 6. ábra szemlélteti az alapvető különbséget a kétfajta számítógép-felépítés között. A következtetéseket a folytatásban az úgynevezett valós idejű alkalmazások szemszögéből tárgyaljuk. Amint látható, a Neumann-szerkezetű processzoroknál a programutasítások és az adatok ugyanazon az adatsínen haladnak, és ugyanazt a memóriaterületet használják. A Harvard-szerkezetű gépeknél két különálló memóriaterület és adatsínrendszer áll rendelkezésre, és az adatok csak a végrehajtott egységekben találkoznak. A Harvard-szerkezetű gépeknél független a két adatforgalom, így az effektív végrehajtási sebesség megnő, mert nincs korlátozás az adatforgalomban, ha ugyanakkor programadatra is igény van a program végrehajtása során. A DSP-processzorok Harvard-szerkezetűek.

Felvetődik a kérdés, hogy miért kell a valós idejű rendszerekben Harvard-szerkezetű DSP-processzort alkalmazni, és miért nem elegendő egy szuper-PC IV (pl. 3 GHz-es processzorral), amely Neumann-szerkezetű? A PC-szerkezetű gépekben alkalmazott processzorokban nincs rendszeresítve a párhuzamos szorzó és más jelfeldolgozást segítő szerkezeti elem, mivel nem erre a feladatra lettek tervezve, így egy lebegőpontos szorzáshoz több mint 40 gépi ciklusra van szükség. Ez a tény nagyon lelassítja a számítási folyamatot. Egy valamire való DSP-processzor sebessége 2 GFlops, ami akár a szerkezetétől függően komplex szorzás, vektorforgatás stb. is lehet, és emellett még adatmozgatást, adat előkészítést stb. is el tud végezni egyetlen ciklusidő alatt. A PC-ben lévő processzor még közepes sebességű valós idejű problémákat – így például hang-, mozgóképlejtetés, modem-, merevlemez-kezelés, CD-meghajtás, memóriaterület-kezelés – is csak segéd-célprocesszorok segítségével tud megvalósítani. Általában ezek a segédprocesszorok DSP-processzorok.

Tipikus DSP-rendszer és környezetének fejlesztése

Ma már a DSP-processzoros fejlesztést segédprogramokkal támogatják, amelyek nagymértékben leegyszerűsítik a fejlesztés folyamatát.

Példaként a 7. ábra szemléltet egy tipikus DSP-fejlesztői rendszerkörnyezetet. Ugyanazt a rendszert változatlan hardverrel alkalmazhatjuk például egy szuperszonikus vadászgép motorjának szabályozására, ugyanabban a repülőgépben a rárepülés folyamatának vezérlésére, egy telefonhálózaton a beszédhang-átvitel minőségének növelésére, vagy netán ugyanazon a rossz telefonvonalon egy HIFI minőségű zene átvitelkor előfeldolgozásra stb. Ilyen rendszereknél a hardvert nem kell módosítani, a processzort nem kell kiszerezni a programozás folyamán, hanem a nyomtatott áramköri lapon lehet programozni magát a processzort és a környezetét is, alkalmazva az úgynevezett JTAG technológiát.



6. ábra. A memória és sínszerkezet a) a Harvard- és b) a Neumann-szerkezetű számítógép esetén

Mint minden, a mai DSP-processzorok is külön problémakörök megoldására specializálódtak, ami nem jelenti azt, hogy a specializált feladatkörön kívül nem alkalmasak más problémák megoldására. A specializált processzorok rendelkeznek az adott problémakör kiszolgálására alkalmas segédáramkörökkel (magán a processzoron belül). Például a motorvezérlő processzorok esetében ezek a következők:

- nagyobb számú, nagyfelbontású, nagysebességű AD-konverterek,
- nullátmenet-detektorok,
- PWM generátorok,
- CAN-busz (ipari nagysebességű kommunikációs busz) stb.

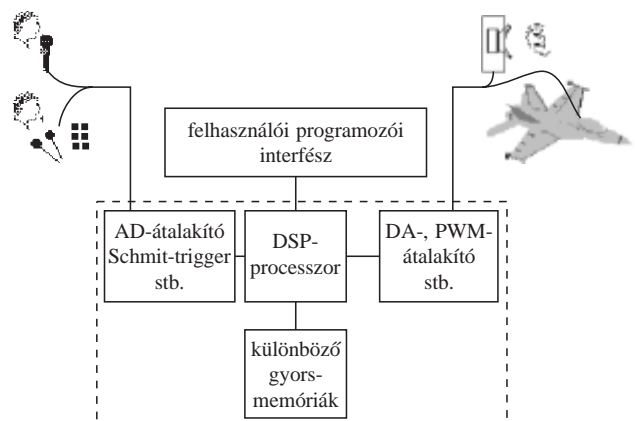
A mai fejlesztői környezetek már felhasználóbarátok, így a fejlesztés folyamán ki lehet indulni egy MatLab kódból függetlenül attól, hogy DSP-processzorral vagy netán nagy összetettségű logikai áramkörrel (CPLD, FPGA) történik a hardveres megvalósítás. Ezen processzorok fejlesztésében a következő eszközöket alkalmazzák: assembler, magasabb szintű nyelvek, emulátorok és szimulátorok.

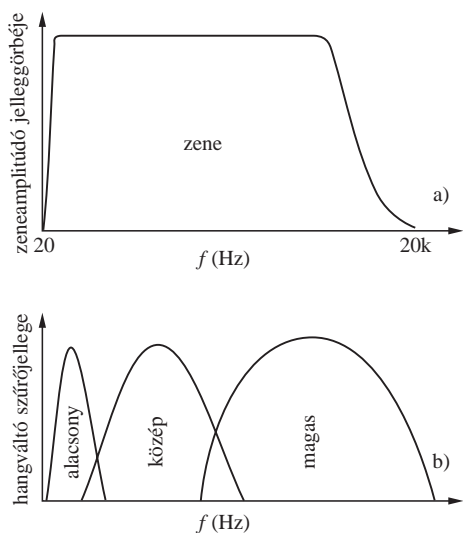
Rengeteg aktuális probléma van, amellyel szemléltethetném a DSP-technikát. A folytatásban két érdekes témát választottam, amelyek két különböző szemszögéből szemléltetik a DSP problémamegoldó képességét. Az egyik ilyen probléma a digitális hangfeldolgozás, a másik probléma pedig zajos jelből a hasznos jel detektálása.

Digitális hangfeldolgozó rendszer

Szemléltetés tekintetében talán a legszerencsésebb, ha olyan példával illusztráljuk a digitális technika szükségességét, amely a mindennapi életben jelen van, és mindannyian érzékeljük a hatását. Ilyen példa a valóságghű zenei reprodukció. Nem foglalkozom az összes problémával, amely a zenei reprodukciós technikát érinti, csak a hangszétválasztással, a hangváltóval. Érdekes problémakör az 5.1 hang reprodukció is, de ezt nem tárgyaljuk, mert nagyon összetett probléma. Ezt a feladatot korrekten csak DSP-vel lehet megoldani, a folytatásban megem-

7. ábra. Egy tipikus DSP-fejlesztői eszköz felhasználási lehetőségének a szemléltetése





8. ábra. A hangváltó hatása a zenei hangra a) a zenei hang a frekvencia tartományban b) a hangváltó amplitúdó jelleggörbéje az alacsonyfrekvencia (basszus), középsáv és a magas frekvenciás tartományban. A hangváltó egyes ágai kimenetén a jel spektruma a következő algoritmus segítségével számítható: alacsony hangszórókimenet = zene · alacsony, közép hangszórókimenet = zene · közép, magas hangszórókimenet = zene · magas.

lített processzort direkt erre a problémakörre fejlesztették ki. A 8. ábra szemlélteti az analóg technika hiányosságát.

A zenei hangtartomány alapján 20 Hz-től 20kHz-ig tart, amint a 8.a ábrán is láthatjuk. Ezt a hangtartományt valóságosan megjeleníteni egyetlen átalakítóval (hangszóróval) lehetetlen. Ezért ezt a tartományt általában felosztják több frekvenciasávra, amelyeket külön-külön jelenítenek meg. A szétválasztást szűrőkkel, úgynevezett hangváltókkal valósítják meg. A szétválasztás a kisjelű vagy nagyteljesítményű jeltartományban is lehetséges. A hangváltó jelleggörbét a 8.b ábra szemlélteti. Az ábráról látható, az egyes szűrők amplitúdó jelleggörbéje nem egyenletes, hanem kerekített. Az R, L és C elemekből felépített hangváltó fázisjelleggörbéje nemlineáris, vagyis az egyes frekvencia komponensek futási ideje különbözik, ami csökkenti a reprodukció minőségét.

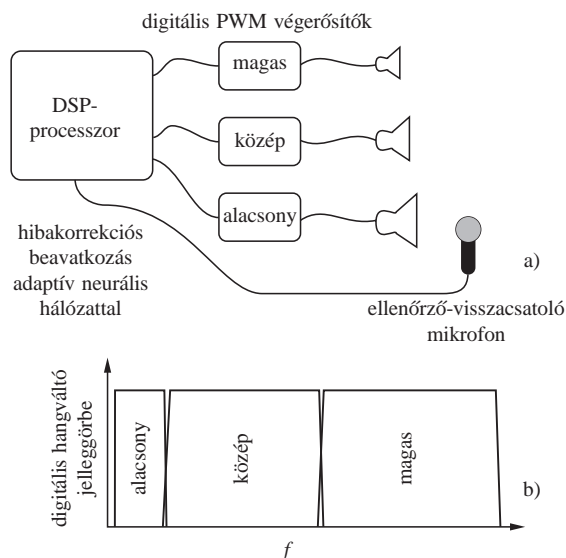
Mindemellett még további torzítások is jelentkeznek:

- az erősítők nemlineáris jellege,
- a hangszórók nemlineáris jellege,
- az erősítő zaja stb.

Emellett még az is rontja a minőséget, hogy majdnem sehol sem tudunk érdemileg beavatkozni. Ha mindezt figyelembe vesszük, az analóg feldolgozó és reprodukciós rendszer elég szánalmas eredményt ad.

Hasonlóan figyeljük meg, mit tudunk a digitális tartományban megvalósítani. Mondhatjuk, hogy a reprodukció terén teljesen digitális rendszert tudunk építeni (9. ábra). A hangváltót, mint digitális szűrőt, általános célú vagy speciális digitális jelprocesszorral valósíthatjuk meg. Amint az ábráról is láthatjuk, a hangváltók amplitúdó jelleggörbéje majdnem ideális (pontosan meghatározott frekvenciatartományokat vág ki határozottan, nincs átlapolás, és nincsenek fedett tartományok), mindezek mellett lineáris fáziszögjelleg, vagyis egyenletes fázisfutás valósítható meg.

Érdekes megoldási lehetőséget nyújt egy cél-DSP-processzor, a TAS3103, amelynek numerikus felülete 76 bit szélességű. Ez a processzor nem csak a zenei alkalmazásokban lehet érdekes, hanem akár komoly tudományos fejlesztések alapeszköze is lehet, amiről könnyen meg is győződhetünk a folytatásban. Felmerül a kérdés: miért van szükség ilyen nagy felbontásra, vagyis 76 bitre, ahol egy bithiba $1,32 \cdot 10^{-23}$ relatív hibát eredményez?



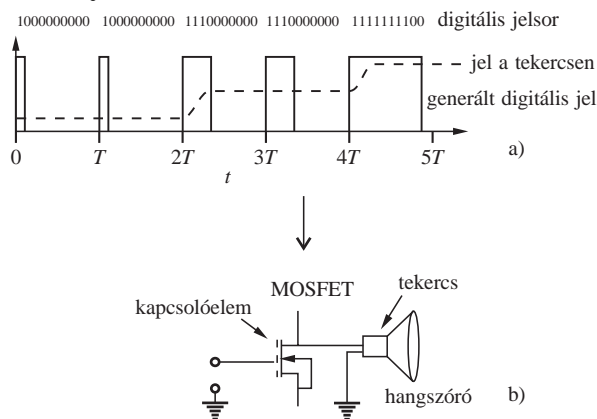
9. ábra. A digitális megvalósítás a) a digitális erősítő rendszer visszacsatoló rekonstrukciós körrel. A végérsítők elvileg 24 bites pontosságúak, fázis- és amplitúdótorzítás nélküliek, valamint visszacsatolható a kimeneti jelük. b) A digitális erősítő rendszer amplitúdó jelleggörbéje, mely majdnem ideális fázis jelleggörbe.

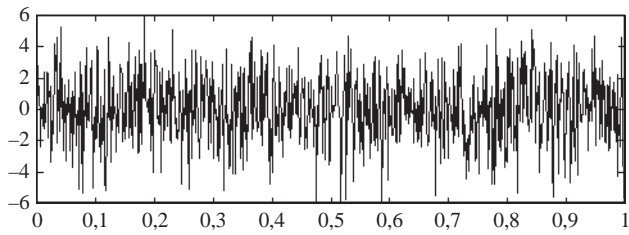
Feltételezzük, hogy 24 bites felbontással mintavételezünk egy jelet, és a feldolgozás folyamán elvárjuk, hogy a feldolgozott jelnél a hiba mértéke ne legyen nagyobb a 24 bitnél. A mintavett jelet és a szűrő együtthatókat is a standard 32 bites formátumban kezeljük. Ha összeorozzuk a két 32 bites számot, a kapott eredmény 64 bites lesz (esetleg még 1 bit hely a maradéknak). Ha ilyen szorzatból jó néhányat különböző előjellel összeadunk, könnyen felgyűlik az összeg 76 bitre. Az összeg felső 32-je adja az eredményt, ami igen jó felbontást biztosít.

A digitális hangváltókból kijövő digitális jelet direktben a digitális végérsítőkre tudjuk vezetni. Itt felvetődik a kérdés, hogy a digitális jelből (olyan jel, amelyiknek két értéke lehet), amely fizikailag nem tartalmaz amplitúdó információt, csak matematikailag, miként nyerhető vissza egy olyan jel, amelyiknek az értéktartománya akár milliárdos nagyságrendű halmazt is képezhet (attól függően, hogy hány bites a feldolgozás felbontása). Ezt egy speciális modulációs technika segítségével lehet megvalósítani, amelyet PWM-nek (Pulse Width Modulation, impulzusszélesség-moduláció) nevezünk. Az impulzusszélességébe van beírva a pillanatnyi amplitúdó értéke. Az impulzus szélességét az egymás után léírt egyesek száma határozza meg. Az így nyert jel egyenáramú komponense tartalmazza az információt az amplitúdó értékéről. Ezt a folyamatot szemlélteti a 10.a ábra.

A fizikai megvalósításban a teljesítményerősítést egy gyors energetikai kapcsoló (Power MOSFET) a PWM-jel ütemében való ki-bekapcsolásával éri el (10.b ábra).

10. ábra. Digitális PWM-jel konverziója amplitúdó értéke a) digitális jelsor b) kapcsolóelem





11. ábra. Az „erősen szennyezett” jel egy reprezentánsa

Az aluláteresztő szűrő maga a hangszóró tekercse. Az alacsonyfrekvenciás hangszóró inductivitása nagy, és ennél a hangszórónál nagy elmozdulás várható, megfelelően nagy dinamikával, ami nehezen valósítható meg korrekten. Itt segíthet a visszacsatolás a futáskésés és elmozduláskorrekció megvalósításában (9.a ábra). A visszacsatoló elem lehet mikrofon, gyorsulásmérő vagy a hangszóróba épített speciális tekercs. A visszacsatolt jelen (pl. adaptív vagy neurális) hálózat olyan előfeldolgozást végez, hogy a hangszóró a jelet minimális hibával reprodukálja.

A reprodukció megvalósítása szempontjából fontos volna a szükséges processzor és az energetikai kapcsoló kapcsolási sebességét meghatározni, amelyet egy csatornára vonatkozóan számítunk ki. Feltételezzük, hogy a reprodukcióra váró jel határfrekvenciája 20 kHz, így a mintavételezési sebesség minimum 2×20 kHz. Azt is feltételezzük, hogy a rendszer felbontása 24 bites, azaz $2^{24} = 16\,777\,216$ különböző szintet kell reprodukálnunk. Innen a kívánt minimális kapcsolási sebesség:

$$40 \cdot 10^3 \times 16\,777\,216 = 671\,088\,640\,000$$

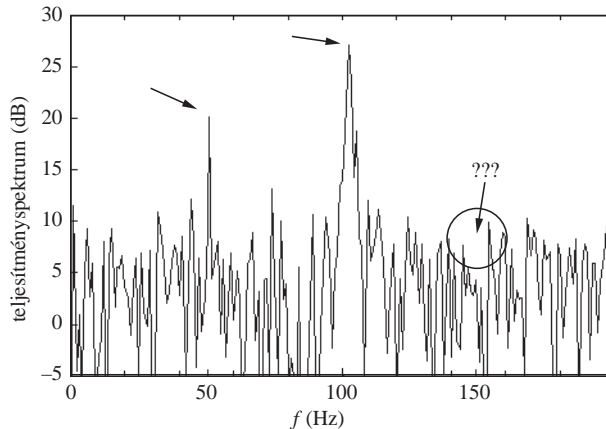
kapcsolási értéket tudjunk egyértelműen megkülönböztetni másodpercenként, vagyis 1,5 ps pontossággal kellene tudni regenerálni az adott impulzusszélességet

A kapcsolási sebesség megnő, ha az új zenei szabványt (ASE/EBU) vesszük figyelembe, ahol a mintavételezési sebesség 192 kminta/s.

Ehhez a kapcsolási frekvenciához ma még kapcsolóelemet nem fejlesztettek ki. Ma a leggyorsabb teljesítmény-MOSFET-ek, amelyek kereskedelmi forgalomban beszerezhetők, 1,5 ns pontossággal tudják az impulzusszélességet rekonstruálni. Ugyanakkor léteznek olyan digitális végerősítők, amelyek elvileg 24 bites felbontással működnek. Vajon akkor hogyan valósították meg ezeket? Az úgynevezett decimációs eljárás módosított változatát alkalmazzák, amellyel csökkenthető az elvárt impulzusszélesség rekonstrukciós sebességkövetelmény.

Ezzel a példával azt szerettem volna bemutatni, hogy a digitális technika alkalmazásának ma nincsenek korlátai a felhasználás terén.

Felhasználás és fejlesztés szemszögéből a mai digitális technika sokkal előnyösebb az analóg technikához viszonyítva. Ezeket az előnyöket a következő kategóriákba tudjuk sorolni: a programozhatóság, ismételhetőség, stabilitás, adaptív algoritmusok könnyebb megvalósíthatósága, lineáris fázisjelleg, lyukszűrő stb. Különös előnye a digitális technikának az analóg technikához képest, hogy meg lehet őrizni az adatokat, és számtalanszor meg lehet ismétetni a folyamatot információvesztés nélkül, sűríteni lehet az adatokat stb. Úgy tűnik, a digitális technika mindenre képes megoldást adni. Ez viszont nem igaz, sok helyen még mindig az analóg technika kínálja a jobb megoldást (lásd a *Roska Tamás* nevével fémjelzett kutatásokat), és a mai, összetett analóg elektronikai csipek között is vannak programozhatóak, ilyen például az FPAA.



12. ábra. A feladatban megadott jel egy periodogramja

Felvetődik a kérdés, hogy a TAS3103-t hol lehetne alkalmazni a fizikában? Minden bizonnyal a lassú folyamatok jeleinek az előkészítésére, előfeldolgozására 6 csatornán külön-külön 48 kHz-en. Fontos, hogy a megfigyelt jel határfrekvenciája illeszkedjen a DSP-processzor mintavételezési frekvenciájához anélkül, hogy frekvenciaátpololás történne. A kibemenő jelek standard 32 bites, úgynevezett I²S formátumúak, és így az itt feldolgozott jelek alkalmasak további DSP- vagy PC-feldolgozásra úgy, hogy adatformátum-váltásra nincs szükség. Várható, hogy rövid időn belül megjelenik ez a processzor 192 kHz-es változatban is.

Nézzünk még egy érdekes problémát

A vett jelen belül a hasznos jel akár pár tíz dB-lel is kisebb lehet, mint a zaj, ami elfedi azt. A feladat a hasznos jel kinyerése a zajból. Különböző módszerek léteznek, most egy egyszerűbbet szemléltetünk, az úgynevezett Welch-eljárást.

A spektrum becslésének az értéke a módosított periodogram átlagértéke:

$$\begin{aligned} E[\tilde{P}_{xx}^i(\omega)] &= \frac{1}{MU} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w(n) w(m) r_{xx}(n-m) e^{-j\omega(n-m)} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{xx}(\beta) W[e^{j(\omega-\beta)}] d\beta, \end{aligned}$$

és az ablakfüggvény spektrumát $W(e^{j\omega})$ (igény szerint tetszőleges ablakfüggvény választható) a következő kifejezés szerint számítjuk:

$$W(e^{j\omega}) = \frac{1}{MU} \left| \sum_{n=0}^{N-1} w(n) e^{-j\omega(n)} \right|^2.$$

A Welch-eljárás varianciája:

$$\text{var}[P_{xx}^w(\omega)] = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=1}^{L-1} E[\tilde{P}_{xx}^{(i)}(\omega) \tilde{P}_{xx}^{(j)}(\omega)] - \left\{ E[P_{xx}^w(\omega)] \right\}^2.$$

Befejezésül analízáljunk egy ilyen jelet. A következő jelle:

$$x(t) = 0,5 \sin(2\pi 50 t) + 2 \sin(2\pi 100 t) + 0,2 \sin(2\pi 150 t)$$

kihat az additív normál eloszlású zaj, nulla középértékkel, kettes effektív értékkel. A Welch-féle eljárást alkalmazva nyerjük ki a spektrális komponenseket az erősen szennyezett jelből. A 11. ábra szemlélteti az „erősen szennyezett” jel egy reprezentánsát.

Az ábráról is látható, a zaj nagymértékben hat a jelle, lehetetlen felismerni magát az alapjelet.

A zajos jel periodogramja a 12. ábrán látható. A számítást egy 1 másodperc hosszúságú idősorra végeztük el, a mintavételezési sebesség 1 kHz. Ez a periodogram nagyon sok hamis spektrális komponenset tartalmaz. Lényeges kiemelni, hogy a 150 Hz-en lévő spektrális komponens elvész a zajban. Az egyszerű periodogramról azt konstatálhatjuk, hogy nem alkalmas a jel frekvenciakomponenseinek egyértelmű felismerésére.

A folytatásban Hann-féle ablakfüggvényt alkalmaztam a Welch-féle analízisben. A 13. ábrán szemléltetett módosított periodogramban, a minta hossza 30 s. Az ábráról jól érzékelhető, hogy a periodogramból a jelenlévő periódus tagok komponensei határozottabban kiválnak a jelenlévő zajból, és elég határozottan kiválik a 150 Hz-es komponens is.

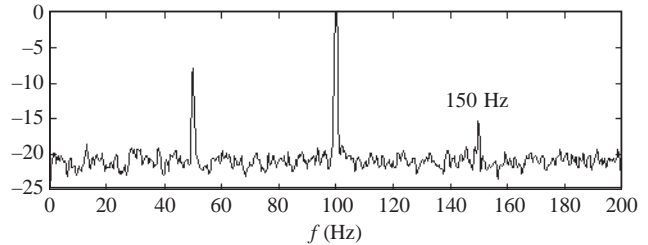
A Welch-módszer valós idejű alkalmazásánál összetett és nagyszámú számításra van szükség, ami eleve feltételez egy összetett, nagysebességű processzort. Ha nagyobb határfrekvenciás zajos jelben szeretnénk kiválasztani a spektrális komponenseket, akkor a nagy számítási igény miatt csak FPGA áramkörrel lehet azt megvalósítani.

Hol lehetne alkalmazni DSP-processzort a fizikában?

Talán mindenhol. Kezdvé a szupergyors jelenségek mérésénél, mérésvezérlésnél, mérésadat előértékelésénél. Például:

- ciklotronoknál, atomreaktoroknál. Itt rengeteg alszervezetet van, amelyek az egész rendszert alkotják és ezeket mind külön-külön nagyon összetett körülmények között úgy kell szabályozni, hogy az egészet is összetett körülmények között egyensúlyban lehessen tartani, ráadásul mindezt nagy beavatkozási sebesség mellett.

- mechanikai terhelés effektusainak mérésében,
- halmazállapot-váltás mechanizmusainak követésére, szabályozására,



13. ábra. Módosított periodogram, az analizált minta hossza 30 s

- szupravezető technikában,
- asztrofizikában,
- biofizikában,
- fizikai kémiában,
- geofizikában

és még sok egyébütt.

Minden ágazatban részletezni lehetne, hogy hol és miként lehetne a most jelenlévő analóg technikát kiváltani, vagy jobbra és effektívebbre cserélni. Azt megmagyarázni, hogy a már most jelenlévő digitális technikát miért építették pont úgy, vagy hogy mi a funkciója, nem ennek a munkának a feladata.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a Bolyai Nyári Akadémia szervezőinek a lehetőségért, hogy a digitális jelfeldolgozással kapcsolatban megtarthattam előadásomat.

Irodalom

- C. MARVEN, G. EWERS: *A simple approach to digital signal processing* – John Wiley & Sons, 1996
 S.W. SMITH: *Digital signal processing* – www.dspguide.com, 1999
 ODRY PÉTER: *Jelfeldolgozás* – Tankönyv, Műszaki Főiskola, Szabadka, 2000
 J.G. PROAKIS, D.G. MANOLAKIS: *Introduction to digital signal processing* – Macmillan, Inc., 1990

MEGEMLÉKEZÉSEK

EMLÉKEZÉS BUDÓ PROFESSZORRA, AKI SZEGEDEN A HÁBORÚ UTÁN A FIZIKÁT ÚJ ÉLETRE KELTETTE

Dombi József
 SZTE, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Budó Ágoston (1914–1969) élete és működése összeforrott Szegeddel. A felsőoktatás terén kifejtett munkásságát ugyanis itt kezdte el 1940-ben, amikor a fiatal egyetemi magántanár Szegedre, az Állami Polgári Iskolai Tanárképző Főiskola Fizika Tanszékére kapott kinevezést, és egy év híjával folyamatosan itt dolgozott az 1969 karácsonya előtti napon bekövetkezett haláláig. Egész életét szentelte a felsőoktatásnak, ennek fejlesztéséért küzdött és harcolt, és nem is eredménytelenül. Emlékeznünk kell rá, mert példakép kell, hogy legyen élete és munkássága, nem szabad annak a feledés homályába merülnie. A volt

hallgatói közül azok, akik az utolsó előadásait hallgatták, túlnyomó többségükben már nyugdíjasok, életpályájuk befejezéséhez közelednek, így lassan fogynak azok, akik még személyesen ismerték.

A főiskolai fizikai tanszékét a nyugdíjba vonult *Frank Jánostól* vette át. Mi sem természetesebb, mint hogy a Nobel-díjas *Debye* mellett eltöltött ösztöndíjas évek után Szegedre kerülő fiatal tudós elkezdte felfrissíteni az oktatott tananyagot. Előadásaival párhuzamosan jegyzetet írt a hallgatók számára, melyet könyvmegosztással sokszorosított. Folyamatos, nyugodt munka azonban

nem alakulhatott ki, hiszen már javában dúlt a második világháború. Az oktatás rendjét zavarta meg az a rendelet, miszerint az 1942-ben harmadéves főiskolai hallgatók a nyári szünetben felkészülhettek a negyedik év anyagából, és szeptemberben szakvizsgázhattak. Megkapva diplomájukat, a katonának behívott tanárok helyére és a visszacsatolt délvidéki iskolákba kaptak kinevezést. Ez az esztendő jelentős volt Budó Ágoston életében, mert egy frissen diplomázott hallgatójával, *Farkas Gabriellával* ekkor kötött házasságot. A katonai behívóját ő is megkapta, és csak nagy nehezen kapott felmentést. Szeged megszállása után következő zavaros időkben is a főiskolán dolgozott. 1949-ben a Debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszékére kapott egyetemi tanári kinevezést, itt oktatott 1950-ig. Ez az egy esztendő szakította meg a Szegeden eltöltött éveket.

Fröblich Pál 1949 őszén hunyt el, a megüresedett egyetemi tanári állásra Budó Ágoston nyert 1950-ben kinevezést. A tanszéken még Fröhlich vezetése alatt kezdődtek el a lumineszcenciavizsgálatok, és a mintegy két évtizedes munkássága során a Rockefeller-alap támogatásával sikerült eme témakör műveléséhez szükséges optikai eszközökkel a tanszéket felszerelnie. 1944 szeptembere végén, közvetlenül a város kiürítési parancsának kiadása előtt a minisztérium elrendelte az értékes eszközök, berendezések nyugatra való menekítését, megvédendő azokat a szovjet megszálláskor várható rablásoktól. E szállítmány sorsáról később nem lehetett megtudni semmit, állítólag bombatalálat érte, a vagonroncsokat pedig kirabolták. Volt némi kísérlet ezeknek a műszereknek a megkeresésére, ám ezek a próbálkozások gyakorlatilag sikertelenek voltak, talán csak a kémikusok találtak meg néhány platinatégelyt, amelyekkel a gyermekek a homokozóban játszottak.

Az új tanszékvezető munkájának megkezdésekor a nehézségek, a megoldandó feladatok garmadjával találta magát szembe. Az előzőkből már kitűnt, hogy a kutatómunka végzéséhez az alapvető feltételek nem voltak biztosítva. De az oktatás helyzete sem volt ennél rózsásabb. A hallgatók létszáma nőtt, a *Kísérleti Fizika* főkéllégium óraszámja a múltbeli két féléven át tartott heti öt órája, négy féléves heti öt órára nőtt. De külön kellett még kétféléves előadásokat tartani a vegyész-, gyógyszerész- és orvostanhallgatók számára is. A főkéllégiumokhoz számolási gyakorlatok tartoztak, másodévtől kezdve pedig laboratóriumi mérési gyakorlatokat kellett a hallgatóknak végezniük. A hallgatók megnövekedett létszáma a gyakorlatok számának növelését, a korszerűségekre való törekvés pedig új gyakorlatok beállítását tette szükségessé. 1949-ben Fröblich Pál mellett két tanársegéd, egy díjas és két díjtalan gyakornok dolgozott. Ilyen létszámmal a megnövekedett oktatási feladatokat lehetetlen volt ellátni. Megindult a harc az álláshelyek szerzéséért, majd azoknak megfelelő emberrel való betöltéséért. Levélostrom indult meg ennek

érdekében, azaz előterjesztések mentek a minisztériumi és akadémiai bizottságokhoz, a Csongrád megyei Tanács Oktatási Osztályához, az egyetemi, városi, megyei pártbizottságokhoz, és nem is egy! Így sikerült 1950 októberére az oktatói állások számát 10 főre emelni, akik mellett még 7 fő demonstrátor is dolgozott.

Az új gyakorlatok tematikájának kidolgozásában minden oktató részt vett, és minden megbeszélésen, sőt a beállított gyakorlatok első mérésein Budó Ágoston jelen volt. Sok nehézséget jelentett, az hogy a tanszék anyagi ellátottsága igen csekély volt, de ezt a kis pénzügyi keretet is nehéz volt célszerűen elkölteni az áruhiány miatt. Egészen primitív dolgoknak, mint például banándugó, banánhüvely, szigetelt vezeték beszerzése is nehézségbe ütközött.

Tetőzte az elfoglaltságot az irdatlan adminisztráció, a szocialista munkaversenyek megszervezése. Nevezetes dátumokra, mint április 4., május 1., november 7., Sztálin elvtárs születésnapja stb., felajánlásokat kellett tenni, azok kiértékeléséről jelentéseket küldeni. Például egy ilyen felajánlási kiértékelésben szerepel, hogy Budó Ágoston a felajánlását 30%-kal túlteljesítette, mert az *Elméleti mechanika* című könyvét a tervezettnél két héttel előbb fejezte be.

Míg Budó Ágoston az intézetet vezetve milliányi gondal, bajjal küzdött, a korábban megkezdett tudományos témájával is foglalkozott. Hetenként három napot töltött Budapesten, a KFKI Budafoki úton lévő spektroszkópiai intézetében, amelynek helyettes vezetője volt.

A tanszék kutatási profilját még Fröhlich Pál munkássága szabta meg, ezért Budó Ágoston is elkezdett a lumineszcenciavizsgálatok témájában dolgozni. Ezen a területen az első feladat a vizsgálatokhoz szükséges mérőberendezések tervezése és felépítése volt. Mint az MTA levelező tagja (1950) létrehozta a Lumineszcencia és Félvezető Tanszéki Akadémiai Kutatócsoportot, amelynek a működéséhez az MTA biztosított bizonyos anyagi fedezetet. Ez tette lehetővé, hogy a mérőberendezésekhez szükséges készülékeket, műszereket beszerezhettük. Célkitűzésünk az volt, hogy a lumineszcenciajellemzőket (emissziós és abszorpciós spektrum, polarizációfok, hatásfok, csillapodási idő) nagy pontossággal tudjuk meghatározni. Míg az irodalomban regisztráló mérőkészülékekről olvashattunk, sőt ezek prospektusai is eljutottak hozzánk, addig a tanszéken egy Zeiss SPM-1 monokromátorból, egy pesti „maszektól” vásárolt fototelektron-sokszorozóból építettünk abszorpció- és emissziómérő berendezést. A fototelektron-sokszorozóhoz szükséges 1000 V-os tápegységet 10 db 100 V-os anódtelep szolgáltatva, a fotóáramot 10^{-8} A/skr érzékenységgű tükrös galvanométerrel, távcsővel mértük. Vásároltunk nagyteljesítményű gerjesztő fényforrásokat, igen magas nyomású Hg- és Xe-lámpákat, amelyeket a tanszéki nagy terhelhetőségű egyenáramú hálózatról működtettük, ezek fényéből interferenciás szűrőkkel hoztuk létre a monokromatikus gerjesztést. Az abszorpcióméréshez szükséges mozz-



gatható küvettatartókat a tanszéki műhely készítette el, az igen magas nyomású, robbanásveszélyes lámpák vízhűtéses házaival együtt.

Miután különböző mérésekkel hitelesítettük a mérőberendezéseket, és ellenőriztük azok pontosságát és megbízhatóságát, kezdődött el az első tudományos vizsgálat, a szekundér fluoreszcencia spektrális hatásának kutatása, hogy a molekulákra jellemző valódi lumineszcenciajellemzők meghatározhatók legyenek. Még viszonylag egyszerű számítással lehetett a közvetlenül mért spektrumoknál reabszorpció hatását figyelembe venni. Az oldat belsejében keletkezett lumineszcenciafény bizonyos hullámhossztartományát ugyanis maga az oldat elnyeli azon az úton, míg az oldatból kilép, de keletkezik az elnyelt lumineszcenciafény miatt szekundér, terciér stb. lumineszcenciafény is. Ezek hatásainak számításba vétele már csak bonyolult számításokkal volt lehetséges. Nem analitikus függvényeket kellett ehhez integrálni, amit úgy végeztünk, hogy felrajzoltuk a szóban forgó függvényeket, és polár-polariméterrel integráltunk.

A mostoha körülmények miatt – talán nem túlzás a jelző – véres verejték árán kaptuk meg azokat a kísérleti eredményeket, amelyek a tudományos közleményeink alapultak. Ennek érzékeltetésére, íme egy lumineszcenciaspektrum felvételének leírása, amely elbeszélés ma már egy hihetetlen anekdotának tűnik, de abban az időben valóban így történt. Mivel a mérés tartama alatt a gerjesztő fény intenzitásának állandónak kellett lennie, ezért a Hg-lámpára kapcsolt feszültséget és a rajta átfolyó áramot mérni kellett, és állandóan figyelni, hogy nem változik-e. Változásnál egy toléellenállással korrigálni kellett az áramintenzitást (1 személy). A monokromátorból kilépő lumineszcenciafény hullámhosszát a monokromátor dobjának állításával lehetett változtatni (1 személy). A kilépő fény által kiváltott fotoáramot távcső segítségével tükrös galvanométerrel mértük (1 személy). A mérési adatok jegyzőkönyvben való feljegyzése külön feladat volt (1 személy). Egy mérésnél tehát négy személy működött közre. Nappali órákat az oktatás és az ügyintézés foglalta le, a mérésekre csak az esti, éjszakai órákat lehetett felhasználni. A kapott adatokat közvetlen a mérés után kiértékeljük, hiszen kíváncsiak voltunk az eredményre. A segítségkéréshez szükséges adatokat előre elkészített görbéről olvastuk le, egy Rheinmetall (általunk traktornak nevezett) elektromechanikus számológéppel végeztük a korrekciós számításokat, mígnem megszületett a korrigált spektrum. Ennek felrajzolásánál az egyes hullámhosszhoz tartozó intenzitásértékeket szinte mindig a prof jelölte be, mégpedig úgy, hogy a kapott mérési adatnak megfelelő helyen egy körzőtűvel átszúrta a mm-papírt, majd egy hajlékony acélvonalzó mellett a görbét úgy húztuk ki hegyes ceruzával, hogy a ceruza hegyének mindig bele kellett pattannia a kiszúrt lyukba.

A prof általában 14 óra tájban ment haza ebédelni, és 17 óra körül újfent a tanszéken volt, azután együtt dolgozott a kis kutatócsapattal. A munkának ritkán volt éjféli előtti vége, és még a hazafelé menetben megbeszéltük a következő napon végzendő feladatokat. És ez így ment hosszú időn keresztül, de megérte, mert a kutatócsoport eredményei nemzetközileg ismertek és elismertek lettek. Ezeket foglalta össze Budó Ágoston 1969-ben tartott akadémiai székfoglalójában. Külföldről jöttek fiatal kutatók, hogy itt dolgozzanak. Neves tudósok látogatták meg a tanszékünket, mint például *Th. Förster*, *Raman*, *Kasha*, *Galanin*, *Zsevandrov* és mások, hogy az itt folyó munkát közvetlenül megismerjék.

Budó Ágoston vezetése során kialakult kutatószellem hatására a tanszék oktatói rendre szereztek tudományos fokozatot, lettek kandidátusok, a tudományok doktori, így tulajdonképpen gondoskodott utánpótlásról. Puritán egyéniség volt, még a látszatát is messze elkerülte annak, hogy beosztása, hivatali tisztsége miatt akár ő, akár az intézet érdemtelenül előnyt szerezzen. Amikor például az MTA III. Osztályának titkára volt, kutatócsoportja nem kapott ekkor sem nagyobb támogatást. A kutatócsoport felvezető részlegének voltak ipari, akkori néven „KK”-megbízásai, amelynek díjazásából bizonyos százalék az intézmény vezetőjét illette. Budó ezt a hivatalból neki járó díjazást soha nem vette fel, mivel ezen megbízási munkákban egyáltalán nem vett részt.

Budó Ágoston munkásságára emlékezve, nem csak azt lehet hangsúlyozni, hogy a II. világháború során a koldusszegénnyé vált Kísérleti Fizikai Tanszéket újraélesztette. Neki köszönhető, hogy az oktatás színvonala magasra emelkedett, hogy a spontán emisszió vizsgálata elvezetett a kényszerített emisszióval való foglalkozáshoz, a magas színvonalú lézeres kutatásokhoz. Közéleti tevékenysége is széleskörű volt. Számátalan akadémiai, minisztériumi bizottságban elnökölt, volt dékán, hosszú időn keresztül az MTA Matematikai és Fizikai Osztályának titkára. Létrehozta a Szegedi Akadémiai Bizottságot, amely székházának építését is irányította, és éveken át volt eme Bizottság elnöke. Az 1951-ben elkészült *Elméleti mechanika* című tankönyve, amelyet német nyelven többször is kiadtak. A háromkötetes *Kísérleti fizika* tankönyve hazánkban a fizikaoktatás bibliájának tekinthető.

Budó Ágoston, a Kossuth-díjas akadémikus, a Munka Érdemrend arany fokozatának birtokosa, az Oktatásügy kétszeres kiváló dolgozója, SZAB emlékérem tulajdonosa mindössze 55 évet élt, és ezt a rövid életet a csordultig töltötte meg az eredményes munka, amelyért az utókor nem tud eléggé hálás lenni. Még a halál is egy akadémiai ülésről való hazatértében, a vonaton érte. A jelen írás, néhány epizódot kívánt Budó Ágoston életéből kiragadni, amelyek talán jellemzik, aláhúzzák életének áldozatos voltát.

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

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

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

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

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

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

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

HU ISSN 0015-3257

A FIZIKA ORSZÁGOS KÖZÉPISKOLAI TANULMÁNYI VERSENY HARMADIK FORDULÓJA A HARMADIK KATEGÓRIA RÉSZÉRE

– 2004

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

A Fizika Országos Középfiskolai Tanulmányi Verseny – a korábbi évekhez hasonlóan – ebben az évben is három kategóriában került megrendezésre. Külön-külön csoportban versenyeztek a szakiskolák tanulói, az általános-, valamint az emelt szintű fizikaoktatásban részesülő diákok.

Mind a három csoport részére három fordulóból állt a verseny. Az első két forduló során elméleti problémákat kellett megoldaniuk a versenyzőknek, míg a harmadik fordulóban mérési feladatokkal kellett megbirkóznuk. A harmadik fordulóban az első két forduló legjobbjai mértek össze tudásukat és ügyességüket.

A BME Fizikai Intézet az emelt szintű fizikaoktatásban részesülő diákok (harmadik kategória) versenyének harmadik fordulóját rendezte. A versenynek ebben a fordulójában tizenkilenc fiatal vett részt. Közleményünkben, erről a versenyről számolunk be.

Dolgozatunkban bemutatjuk a versenyforduló kezdetekor kiadott írásos anyagot úgy, ahogy a versenyzők megkapták. Ezen anyag segítségével akartuk megismertetni a versenyzőket a megoldandó feladattal, és a feladat megoldásához rendelkezésükre álló eszközökkel. A kiadott írásos anyagok bemutatása után vázoljuk a kitűzött feladatok megoldásának módját, majd beszámolunk a verseny közben és az értékelés során szerzett tapasztalatainkról, és a versenyzők eredményeiről, végül köszönetet mondunk mindazoknak, akik közreműködtek a verseny előkészítésében, vagy lebonyolításában.

A feladat

Vasmas relatív permeabilitásának meghatározása, valamint elmozdulásérzékelők összeállítása, hitelesítése és alkalmazása.

A. Relatív permeabilitás mérése

3 V-os, tápfeszültséget alkalmazva, határozza meg a mérőhelyen található transzformátorlemez anyagának az adott körülmények között érvényes relatív permeabilitását.

B. Elmozdulásérzékelők összeállítása, hitelesítése és alkalmazása

B.1. A rendelkezésére álló elemekből állítson össze olyan eszközt, amelynek valamely mérhető jellemzője egy elmozdulástól függ. Az összeállítással egy elmozdu-

lás (távolság) mérésére alkalmas érzékelőt kap. Rajzolja le az érzékelő vázlatát, és röviden ismertesse működését.

B.2. Hitelesítse az összeállított érzékelőt, azaz határozza meg a mérhető jellemző és az elmozdulás közötti kapcsolatot.

B.3. A hitelesítés során kapott mérési eredményeit adja meg táblázatban, és tüntesse fel grafikonon is.

B.4. A hitelesített eszközzel mérje meg a kiadott zománcozott rézhuzal átmérőjét.

B.5. A rendelkezésére álló elemekből többfajta elmozdulásérzékelő állítható össze. Lehetőleg állítson össze Ön is többfélért, és végezze el ezek hitelesítését is, majd ezekkel is mérje meg a kiadott zománcozott rézhuzal átmérőjét.

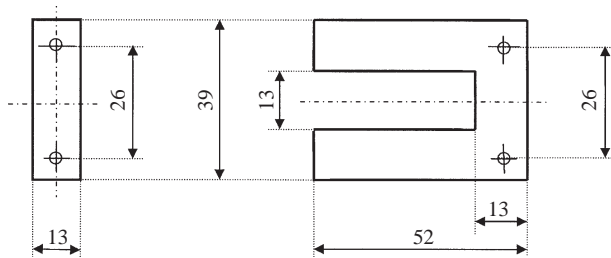
B6. Röviden jellemezze az összeállított eszközöket.

Az értékelés megkönnyítése érdekében a mérésekhez mindig 3 V-os tápfeszültséget alkalmazzon, és ha mérése valamely részében állandó frekvenciát akar alkalmazni, akkor 50 Hz-es frekvenciát használjon!

A verseny során végzett munkájáról készítsen részletes jegyzőkönyvet!

A feladat megoldásához rendelkezésre álló anyagok és eszközök:

- 2 db tekercs (mindegyiken 600 menet) végeiken banándugós huzallal
- 26 db U alakú vasmas lemez
- 26 db I alakú vasmas lemez
- 2 db csavaranyával
- 1 db HAMEG gyártmányú hanggenerátor-teljesítményerősítővel (a használatával kapcsolatos tudnivalókat a mérőhelyen megtalálja)
- 1 db HAMEG gyártmányú multiméter (ismertetését a mérőhelyen megtalálja)
- 1 db „univerzális kéziműszer” (a használatával kapcsolatos tudnivalókat a mérőhelyen megtalálja)
- 1 db plexidoboz, belsejében kondenzátorral, továbbá 2 Ω -os és 10 Ω -os ellenállással, banánhüvelyes kivezetésekkel, (a kondenzátor kapacitásának értékét a doboz oldalán feltüntettük)
- 10 db 0,2 mm vastag műanyaglapocska
- 1–1 db 1, 2, 4 és 5 mm vastag műanyaglapocska
- Csavarhúzó és fogó
- Mérőzsinórok, banándugóval és csatlakozó kábelek a hanggenerátorhoz és az erősítőhöz
- Milliméterpapír szükség szerint
- Az ismeretlen átmérőjű zománcozott rézhuzal



1. ábra

A vasmaglemezek vastagsága 0,5 mm, és további méreteik az 1. ábráról leolvashatók. A lemezek felületkezeltek, így az örvényáramok kialakulásának megakadályozása miatt külön szigetelést nem igényelnek.

Megjegyzések

- Ha a kiadott műszerek használatával kapcsolatban problémái jelentkeznek, forduljon a felügyelő tanárokhoz.
- Ha munkája közben rendellenességet tapasztal, azonnal jelentse a felügyelő tanároknak.
- Tartsa be a balesetvédelmi előírásokat! Vigyázzon saját magára és az eszközök épségére!

A feladat megoldása

Az A feladat megoldásához a 26 db U alakú lemezből összeállított vasmagra ráhúztuk az egyik tekercset, majd az összefogott 26 db I alakú lemez felhasználásával zárttá tettük a vasmagot.

A zárt vasmagos tekercs önindukciós együtthatója mérésrel és számítással is meghatározható. A két eredmény összevetéséből megkapjuk a transzformátorlemezek relatív permeabilitásának értékét.

Méréssel a tekercs önindukciós együtthatója – a rendelkezésre álló elemek felhasználásával – soros rezgőkörrel határozható meg legegyszerűbben. Az alkalmazott kapcsolást a 2. ábra mutatja, ahol $C = 4,36 \mu\text{F}$.

Ismeretes, hogy a soros rezgőkör árama rezonancia esetén éri el a legnagyobb értékét. Rezonancia akkor jön létre, ha:

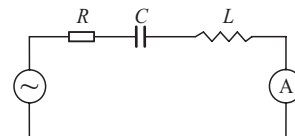
$$(2\pi f_0)^2 = \frac{1}{LC}$$

Ha az összeállított áramkörben állandó (3 V-os) generátor feszültség mellett, a frekvencia változtatásával, az áramot mérve megkeressük a rezonanciafrekvenciát, (f_0 -t), akkor a kondenzátor kapacitását (C) ismerve meghatározhatjuk a tekercs önindukciós együtthatóját (L).

Öt mérési eredmény átlagát véve azt találtuk, hogy a rezonanciafrekvencia: $f_0 = 128,4 \text{ Hz}$, 2,02%-os hibával. A mérési eredmények felhasználásával a zárt vasmagos tekercs önindukciós együtthatója:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} = \frac{10^6}{4 \cdot \pi^2 \cdot 128,4^2 \cdot 4,36} = 352,39 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Számítással a tekercs önindukciós együtthatóját az alábbi összefüggés felhasználásával határozhatjuk meg:



2. ábra

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 A N^2}{l_v},$$

ahol μ_r a keresett relatív permeabilitás, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ a vákuum permeabilitása, A a vaskeresztmetszet (a lemezek méretéből meghatározhatóan $1,3 \times 1,3 \text{ cm}^2$), N a tekercs menetszáma és l_v a „közepes vashossz” (a lemezek méreteiből $2 \cdot (2,6 + 5,2) = 15,60 \text{ cm}$).

Az adatok felhasználásával:

$$L = \mu_r \cdot 49,01 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

A mérésrel és a számítással kapott eredményeket összevetve:

$$\mu_r = \frac{352,39 \cdot 10^{-3}}{49,01 \cdot 10^{-5}} = 719,02$$

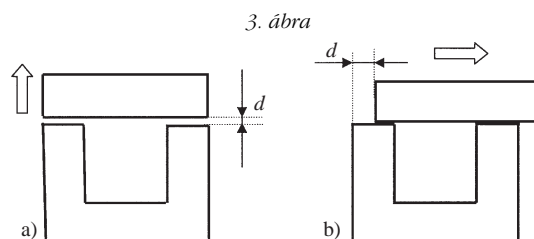
A feladat B részének megoldására két lehetőség kínálkozik. Az egyik esetben egy tekercset helyezünk el a lemezekből kialakított vasmagon, és a tekercssel kialakított soros rezgőkör rezonanciafrekvenciáját vagy a tekercs önindukciós együtthatóját (esetleg impedanciáját) vizsgáljuk a vasmag mágneses ellenállásának függvényében.

A másik esetben két tekercset helyezünk el a vasmagon és az így létrejött transzformátornak állandó primer feszültség (3 V) mellett a szekunder feszültségét, vagy az áttételét vizsgáljuk a vasmag mágneses ellenállásának függvényében.

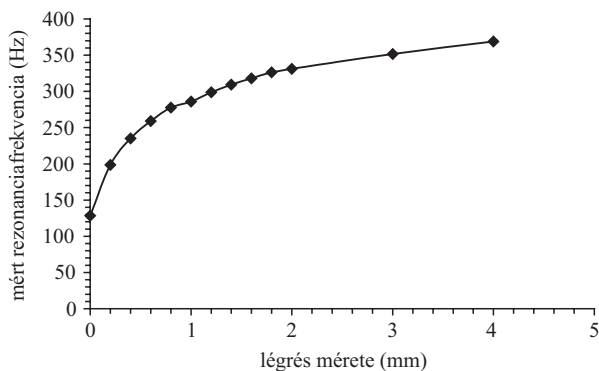
A vasmag mágneses ellenállása elsősorban a 3. ábrán bemutatott módon változtatható. Az I alakú lemezekből kialakított vasmag részt távolítva a tekercsetek kitöltő U alakú lemezekről, a mágneses körben lévő légrés méretének változtatásával módosítható a mágneses ellenállás. De változtatható a mágneses ellenállás az I alakú lemezekből álló résznek az U alakú lemezekben történő elcsúsztatásával is.

Látható volt, hogy a megméréndő drótvastagság valamivel nagyobb mint 1 mm. Tehát érzékelőnkkel ilyen nagyságrendű távolságot kell megmérnünk.

A szóba jöhető összeállítások jellemzőit kimérve, azt lehet megállapítani, hogy a mágneses ellenállásnak a 3.b ábra szerinti változtatásával megfelelő pontossággal csak nagyobb, 4–8 mm-es távolságok mérhetők. Ezért a tovább-



3. ábra



4.a ábra. Vasmagos tekercs rezonanciafrekvenciája a légrésméret függvényében

biakban csak a 3.a ábra szerinti összeállításokon végzett méréseink eredményeit közöljük.

A vasmagon elhelyezett tekercssel kialakított soros rezgőkör rezonanciafrekvenciáját, illetve ennek ismeretében a tekercs önindukciós együtthatóját a légrés 0,2 mm-es lépésekben történő változtatása közben mértük. A légrés méretét az erre a célra kiadott műanyag lapocskák felhasználásával változtattuk. Minden légrésméretnél öt-öt mérést végeztünk és a kapott eredmények számtani közepét vettük figyelembe. (A mérések hibája nem volt nagyobb, mint 2%.) Mérési eredményeink felhasználásával készült a 4. ábra.

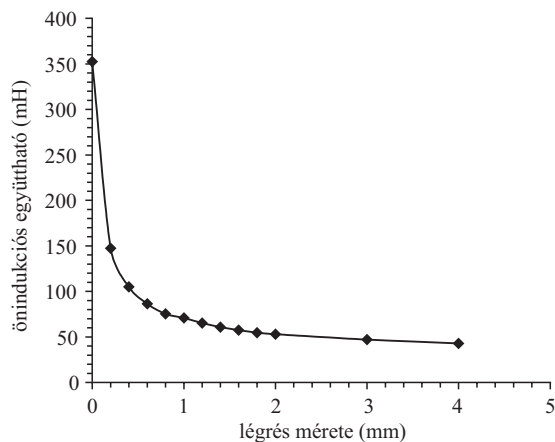
A két tekercs és a vasmag segítségével kialakított transzformátor viselkedését 3 V-os primer feszültséget alkalmazva, a légrést 0,2 mm-es lépésekkel változtatva vizsgáltuk. Egy adott légrésméret mellett a szekunder feszültséget öt-öt alkalommal mértük meg, és az így kapott értékek számtani közepét vettük figyelembe. (A mérés hibája kisebb volt, mint 0,5%.) Mérési eredményeink felhasználásával készült az 5. ábra.

A mérési eredményeket feltüntetető ábrák – „hitelesítési görbék” – felhasználásával lehet megmérni a kiadott zománcozott huzal átmérőjét. A légrés méretét a mérendő mintával állítjuk be, majd megmérjük az érzékelő kiválasztott jellemzőjét (a soros kör rezonanciafrekvenciáját, a tekercs önindukciós együtthatóját, vagy a transzformátor szekunder feszültségét). A kiválasztott jellemző értékének ismeretében a grafikonokról leolvasható a minta mérete. A kiadott zománcozott huzal átmérője: $D = 1,24$ mm volt.

A felrajzolt grafikonok azt mutatják, hogy a kialakított érzékelők 2–3 mm-ig jól használhatók.

A versenymunkákkal kapcsolatos tapasztalatok

A vasmag relatív permeabilitását a legtöbbször a középiskolákban használatos Függvénytáblában található, a tekercs önindukciós együtthatóját megadó képlet felhasználásával határozták meg. Megmérték a légmagos és az I alakú (néhányan az U alakú) vasmag lemezekkel kitöltött tekercs önindukciós együtthatóját, majd a két érték hányadosát véve számították ki a lemezek anyagának relatív permeabilitását. Az így kapott eredmények 4 és 5 körül változtak.



4.b ábra. Vasmagos tekercs önindukciós együtthatója a légrésméret függvényében

A versenyzők zöme nem vette figyelembe, hogy az általuk használt összefüggés milyen feltételek mellett alkalmazható.

Nem tűnt fel senkinek sem, hogy a Függvénytábla az indukció függvényében 3000-tól 64-ig változó értéket ad meg a transzformátorlemezek relatív permeabilitására.

Akadott olyan versenyző is, aki eltérő értéket várt az I és az U alakú lemezek permeabilitására. Néhány versenyző a tekercsbe helyezett vasmaglemezek számának változtatásától várta a relatív permeabilitás módosulását.

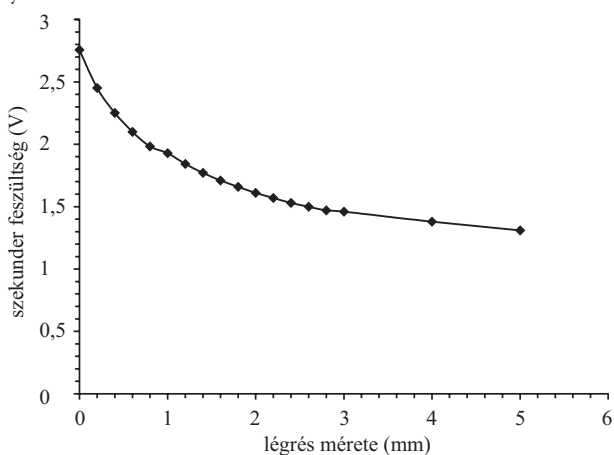
Két versenyző volt, aki – helyesen – teljesen zárt vasmaggal végezte vizsgálatait.

Az elmozdulásérzékelő kialakítására és hitelesítésére majdnem mindenkinek volt jól használható ötlete. Észrevették azt, hogy a vasmagos tekercs önindukciós együtthatója és impedanciája, a transzformátor áttétele függ a légrés méretétől.

Az önindukciós együtthatót soros rezgőkör segítségével vizsgálták. A tekercs impedanciáját az Ohm-törvény segítségével állapították meg, áram és feszültség méréssel. Sajnos sokan „ideális” tekercssel számoltak, és nem vették figyelembe az impedancia valós részét, az ohmos ellenállását.

Többször készítették elmozdulásérzékelőt úgy, hogy a tekercsből kihúzták a vasmagot és e közben mérték a

5. ábra. Transzformátor szekunder feszültsége a légrésméret függvényében



tekercs önindukciós együttthatójának, vagy az impedanciájának a változását. Ennél a megoldásnál használtak I és U alakú lemezekből készített vasmagot is.

A jegyzőkönyvek értékelése alapján valószínűsíthető, hogy a versenyzők nagy része nem volt tisztába azzal, hogy a relatív permeabilitás a mágneses tértől (a mágneses térerősségtől, illetve az indukciótól) és az anyagtól függő jellemző.

Az elméleti fordulók után a versenyzők pontszáma 250 és 295 között változott. A harmadik forduló „széthúzta” a mezőnyt, és néhány esetben jelentősen módosította a sorrendet. A gyakorlati forduló jegyzőkönyveire adott pontszámok 20-tól 200-ig változtak.

Az elméleti és a gyakorlati fordulókra elért pontszámok összesítése után a pontszámok 280 és 465 között változtak.

Az első tíz helyen öt vidéki és öt budapesti diák osztozott.

A résztvevők véleménye szerint nehéz volt a feladat. Tekintettel arra, hogy akadt olyan diák, aki helyesen oldotta meg a kitűzött feladatot, úgy gondoljuk, hogy az megfelelő színvonalú volt. Egy versenyen, ahol sorrendet kell megállapítani, nem lehet cél, hogy a feladatot minél többen jól oldják meg.

Az összesített eredmények alapján a 2004. évi verseny első tíz helyezettje

1. VÍGH MÁTÉ a PTE Babits Mihály Gyakorló Gimnázium és Szakközépiskola tanulója 465 ponttal

2. KÓMÁR PÉTER, Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium, 442

3. MAZROA DÁNIEL, SZTE Ságvári Endre Gyakorló Gimnázium, 395

4. Kanász N. Márton, Árpád Gimnázium (Bp.), 381

5. Németh Adrián, Fazekas M. Fővárosi Gyak. Ált. Isk. és Gimn., 380

6. Berczédi Balázs, Szilágyi Erzsébet Gimn. és Koll. (Eger), 379

7. Horváth Márton, Fazekas M. Fővárosi Gyak. Ált. Isk. és Gimn., 376

8. Kaposi Ambrus, Pannonhalmi Bencés Gimn. és Kollégium, 354

9. Rácz Béla András, Fazekas M. Fővárosi Gyak. Ált. Isk. és Gimn., 351

10. Balázs Krisztián, PTE Babits M. Gyak. Gimn. és Szakközép., 347

Köszönetnyilvánítás

A verseny lebonyolításához szükséges anyagi hátteret az Országos Közoktatási Értékelési és Vizsgaközpont biztosította. Ezt ezúton is köszönjük. A verseny lebonyolításához szükséges eszközök elkészítéséért és a megfelelő körülmények megteremtéséért Horváth Bélának, Halász Tibornak, Kovács Ferencnének, Gál Bélának és Mezey Miklósnak mondunk köszönetet. Reméljük, hogy munkájuk eredményeként a versenyzők jól érezték magukat a verseny alatt. A feladat kitűzésével, a verseny lebonyolításával kapcsolatos hasznos tanácsaiért Tóth Andrásnak és Kálmán Péternek mondunk köszönetet. A versennyel kapcsolatos adminisztrációs és gazdasági ügyek intézéséért Köves Endrénét és Gál Bélánét illeti köszönet. Elismerés és köszönet illeti mindazokat, (szülőket, tanárokat, barátokat stb.) akik segítettek a versenyzők munkáját és ezzel hozzájárultak a verseny sikeréhez.

HÍREK – ESEMÉNYEK

A 2004. ÉVI BOLYAI-DÍJAS: BOR ZSOLT AKADÉMIKUS

Bor Zsolt 1949-ben született. Nagyon korán jelét adta kivételes képességeinek: középiskolás korában már korosztálya kiemelkedő tehetségének számított.

Az egyetem elvégzése után a József Attila Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén kezdett dolgozni, ahol a tradicionális fluoreszcenciavizsgálatokra épülő modern lézerfizikai kutatások meghatározó egyéniségévé vált. Irányításával az Intézet a lézerfizika nemzetközi szinten kiemelkedő, rangos műhelye lett. Nevéhez fűződik az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék alapítása, jelenleg is ennek tanszékvezetője. Kiemelendő, hogy a szegedi fizikai iskola legendás alakja, Budó Ágoston tragi-

A Díjbizottság nevében Roska Tamás állította össze a díjazott méltatását.

kusan fiatal elhalálózása után Bor Zsoltnak döntő érdeme volt abban, hogy mára a szegedi egyetem fizikai iskolája a magyar fizikusközösség nagyra értékelt műhelyévé lett.

Bor Zsolt tudományos munkásságának középpontjában a lézerek működésének megértése, fejlesztése és gyakorlati alkalmazása áll.

Pályájának kezdetén egy új lézerfizikai jelenséget fedezett fel, amelyet felhasználva, rendkívül rövid, úgynevezett femtoszekundumos lézerimpulzusokat sikerült előállítania. Rácz Bélával és Szabó Gáborral kidolgozta ezen impulzusok erősítésének és időtartamának mérésére szolgáló módszereket. A femtoszekundumos lézerimpulzusok a tudomány számára azért fontosak, mert segítségével még a milliomod másodperc milliomod részé-

nél is gyorsabban lejátszódó fizikai biológiai és kémiai jelenségeket is folyamatusukban lehet követni.

Tanítványaival, *Horváth Zoltánnal* és *Osvay Károllyal* megalapozta a modern optika egyik új ágát, a femtoszekundumos optikát, amely az extrém rövid lézerimpulzusok tér- és időbeli viselkedését írja le. Kimutatták, hogy a femtoszekundumos impulzusok korlátozott térbeli tartományban szuperluminális, azaz fénysebességet meghaladó sebességgel terjednek.

1995-ben a houstoni Rice Egyetem adjunct professzora lett, ahol egy szegedi tanítványával, *Erdélyi Miklóssal* új módszereket dolgozott ki egy egzotikus lézernyaláb, az úgynevezett nemdiffraktáló lézernyaláb kísérleti előállítására.

Alaputatási eredményeit gyakorlati célokra is sikeresen felhasználta. A nemdiffraktáló lézernyalábok alkalmazásával sikerült megnövelnie a fotolitográfiai módszerek feloldóképességét. A fotolitográfia az integrált áramkörök, például számítógépchipek előállítási technológiája, az elektronikai ipar egyik legbonyolultabb és egyben legfontosabb eljárása.

San Diegóban a Cymer Inc. laboratóriumában a fotolitográfiai excimer lézerek fejlesztésén dolgozott. A Cymer lézerek segítségével állítják elő jelenleg a világ számítógép-processzorainak 80%-át.

Ugyancsak a Cymer Inc.-nél a kvarc optikai tulajdonságait tanulmányozta. Kimutatta, hogy a kvarcból készült lencserendszereket az új litográfiai eljárásokban is változatlanul lehet majd használni. Ez gazdaságilag nagyon lényeges, mert a rendkívül termelékeny litográfia technológiai alkalmazhatóságát mintegy tíz évvel kiterjesztette, alacsonyán tartva ezzel a számítógép-memóriák árát.

Az interdiszciplináris alkalmazott kutatások területén is sikeres volt. *Kemény Lajos* szegedi bőrgyógyászprofesszorral a pikkelysömör (*psoriasis*) gyógyítására lézeres eljárás dolgozott ki, melyet ma már világszerte alkalmaznak. Ugyancsak *Kemény* professzorral a szénanátha kezelésére fototerápiás eljárást és készüléket fejlesztett ki. Ezt az úgynevezett Rhinolight eljárást több európai országban is használják.

1994-ben a *US-Hungarian Joint Fund* támogatásával Irvine-ban, *Juhász Tiborral* egy egykor Szegeden végzett fizikussal femtoszekundumos impulzusoknak az emberi

szaruhártyával való kölcsönhatását vizsgálta. Az akkor céltalannak látszó kutatásokra alapozva, *Juhász Tibor* Irvine-ban megalapította az Intralase Inc.-t látáskorrekciós lézerek gyártására. Az Intralase kutatásfejlesztési részlegében a szegedi fizikusoknak meghatározó szerepe volt és van. Intralase lézerekkel évente 150 ezer látáskorrigáló műtét végeznek.

A tudományos eredmények hazai és nemzetközi visszhangjára jellemző, hogy a Magyar Tudományos Akadémia 1990-ben, 41 évesen választotta levelező tagjává, amit követett 1993-ban az Academia Europaea tagsága és az 1994-ben kapott Széchenyi-díj. A Pro Renovanda Cultura Hungariae 1994-ben Pázmány Péter-díjjal, Szeged városa 1998-ban Pro Urbe-díjjal jutalmazta. Mintegy 350 dolgozatot publikált, amelyekre 1000-nél több független hivatkozást kapott. Szabadalmainak száma 13.

Bor Zsolt iskolateremtő személyiség: tanítványai közül öten professzori kinevezést kaptak, több mint 14 tanítványa szerzett kandidátusi vagy PhD fokozatot. Legelső doktorandusza, *Szabó Gábor*, 2004-ben lett az MTA levelező tagja. Tudományos diákkörben tevékenykedő tanítványai közül négyen kaptak Pro Scientia-érmet. Megalapítója és vezetője a Szegedi Tudományegyetem fizika doktori programjának. Sokrétű tudományos szervező, tudományirányító munkásságából az MTA Fizikai Tudományok Osztályának osztályelnöki pozíciója, a Felsőoktatási és Tudományos Tanács és a Magyar Akkreditációs Bizottsági tagsága emelhető ki.

Jelenleg olyan interdiszciplináris kutatásokat tervez, melynek célja a „szuperlátás” létrehozásának technikája. Az egészséges ember látásának élességét ugyanis a szemlencse természet adta, apró optikai hibái is korlátozzák. Egyes adatok szerint a látóideg-hártya elvileg akár 6-szor több optikai részlet észlelésére is képes lenne. Az apró optikai hibák műtéti korrekciójával, melynek fizikai részletein is tervez kutatásokat, a „szuperlátás” esetleg megvalósítható lesz.

Egy másik érdekes alkalmazott kutatás a mesterséges szaglász területe. *Szabó Gábor* és *Bozóki Zoltán* vezetésével a tanszéken szuperérzékeny, úgynevezett fotoakusztikus gázérzékelőket fejlesztettek ki. Úgy tűnik, hogy az érzékenység további növelésével a módszer a robbanószerek és drogok észlelésére is alkalmas lehet.

BOR ZSOLT BESZÉDE A DÍJ ÁTVÉTELEKOR

Hölgyeim és Uraim!

Én a Szegedi Egyetemen az Optikai és Kvantumelektromikai Tanszéket vezetem és nem a Retorika Tanszéket. Ezért senki ne várja tőlem, hogy magasaróptű beszédet mondjak el, annál is inkább, mert jelenleg a szívem a torkomban dobog, és ezért nebezen kapok levegőt. De tudtam én azt, hogy ez így lesz, ezért gondolataimat papírra vettem, amelyre, úgy látom, az van írva, hogy:

Elhangzott 2004. október 10-én a Magyar Állami Operaházban.

Tisztelt Köztársasági Elnök Úr, Miniszterelnök Úr, Hölgyeim és Uraim! Kedves Fiatalok!

Megilletődötten és köszönettel veszem át a Bolyai-díjat. Munkatársaimmal és tanítványaimmal osztozom a dicsőségben. Bolyai-díjammak ők is alkotó részesei, merthogy a kutatás kollektív tevékenység. Köszönöm tehetségüket, lelkesedésüket és munkájukat, amelynek eredményeképpen ma ebben az elismerésben részesültem.

Megkülönböztetett tisztelettel üdvözlöm a Bolyai-díj alapítóit. Köszönettel tartozom nekik, akik személyemen



keresztül az értékteremtő tudományt díjazták. Övezzék őket a megérdemelt köztisztelet.

Hölgyeim és Uraim, vagy ahogyan egykor, egy szegedi professzor szólította diákjait: „Dámák és Daliák!”

A rendszerváltás során az állami vagyon döntő része egykettőre átkerült magánkézbe, ezért ma joggal elvárható, hogy a magánszféra is támogassa a szellemi alkotómunkát, méghozzá a vagyoni helyzetének megfelelő arányban. Mintaszerű példája ennek a Bolyai-díj, amely a tehetsős, de a nemzet sorsáról, felelősen gondolkodó Mecénások példaértékű kezdeményezése.

Köztársasági Elnök Úr! Önt – a tudós embert, tagtársamat a Magyar Tudományos Akadémián – kérem, buzdítsa gazdaggá lett polgárainkat arra, hogy legyenek bőkezű Mecénásai szellemi életünknek, mint egykor Széchenyi István vagy a Festetics-dinasztia volt. Bátran élesszék újra a mecénatúra nemes intézményét. Érdemes, mert a bőkezű mecénásokat a nemzet megsüvegezi, és emléküket az utókor jó szívvel megőrzi.

Hölgyeim és Uraim, Dámák és Daliák!
A tudomány nem a tudósok magánügye, hanem nemzeti stratégiai ügy. Az Európai Unió nem inkubátor és nem gyógyszanatórium, hanem a formálódó új világ új harcmezeje, ahol nem karddal és puskával fognak hadakozni, hanem a szellem erejével. Ezért a jövőben nekünk nem tagbaszakadt Erős Jánosokra, hanem agyafűrt Bolyaiakra lesz szükségünk, akik majd „a semmiből ismét egy új világot teremtenek”.

Miniszterelnök Úr! GDP arányait tekintve, Magyarország harmadannyit költ kutatás-fejlesztésre, mint a világ fejlődésre ítélt szerencsésebb része, így világos, hogy nemzetgazdaságunk stabilitását nem a kutatás-fejlesztési kiadások veszélyeztetik. Ennek ellenére, gazdasági döntéshozóink konokul el szoktak zárkózni az efféle kiadások növelésétől, mondván, hogy a kutatás támogatására, sajnos, most éppen nincs pénz. Műkedvelő történésként tudom, még soha nem volt példa arra a világ történelmében, hogy egy ország a kutatás-fejlesztési kiadások miatt ment volna tönkre. Az ellenkezőjére viszont sok példa volt. Például a Szovjetunióé.

Világos, hogy a szovjet birodalom nem a szögesdrótok átvágásától omlott össze, hanem attól, hogy reménytelenül alulmaradt a technológiai fölény megszerzéséért vívott harcban.

Kedves Fiatalok! Okos tudóspalánták! Hozzátok szólok most.

Ti vagytok szüleitek szemefénye. Ti vagytok az ország szemefénye. Ti vagytok a mai nap főszereplői. Sorsotokat el nem kerülhetitek, Ti vagytok a jövő Bolyai Jánosai.

Tanuljatok meg mindent, ami érdekes és hasznos lehet. Legyetek bátrak, kezdeményezők. Bizonyítsátok be, hogy a tudósok is lehetnek megasztárok. Tudjátok és legyetek büszkéek arra, hogy olyan népnek vagytok gyermekei, amely sokkal jelentősebb mértékben gyarapította a világ szellemi kultúrkincsét, mint amennyi a nemzet lélekszáma alapján elvárható lett volna. Legyetek büszkéek magyarságotokra. Legyetek méltó utódai elődeiteknek.

Menjeteek külföldre is, ismerjétek meg a világ tudományát, de közben soha ne feledjétek, hogy magyarok vagytok, és mint tehetséggel megáldott magyarok, felelősök vagytok saját népetek boldogulásáért. Előbb-utóbb gyertek haza, még akkor is, ha ez anyagilag nem kifizetődő. Gyertek haza, mert a tudós tehetsége nemcsak önmagáé, hanem a nemzeté is.

Tehetségek mindenhol vannak. A határokon innen és a határokon túl. De a határok bizony időnként mozognak. Hol erre, hol arra. Az, aki ma még határon túli, tíz év múlva már határon belüli lesz, az EU határán belüli. Nekünk most az a kötelességünk, hogy a 15 millió magyar között találjuk meg a tehetségeket, azokat, akik majd az Európai Unióban az egész magyar nemzetért fognak dolgozni. Ezért örömteli, hogy a nézőtéren itt ülnek a határon túli diákok és tehetséggondozó tanáraik is.

Hölgyeim és Uraim! A tehetséggondozásnak sok fajtája van. A KöMaL, azaz a *Középtiskolai Matematikai Lapok* például 1893 óta szervez matematikából és fizikából feladatmegoldó versenyeket. Ha a leendő mecénások közül bárki is valódi értékeket közvetítő, patinás nemzeti kincset kívánna támogatni, ajánlom szíves figyelmébe a KöMaL-t. Soha, sehol a világon nem volt még egy ilyen sikeres tehetséggondozó intézmény, mint a KöMaL. A győztes feladatmegoldók között olyan neveket találunk, mint *Teller Ede, Bay Zoltán, Wigner Jenő, Neumann János, Szilárd Leó, Kármán Tódor, Gábor Dénes* és *Erdős Pál*.

A KöMaL-nak személy szerint én is sokat köszönhetek. Például azt, hogy érdeklődésemet a versenysporttól a tudomány felé fordította.

Hölgyeim és Uraim! A talentumok természetrajzához hozzátartozik, hogy általában nehezen ismerhetők fel és könnyen összetéveszthetők a hiperaktív rosszcsontokkal. Csak a legkiválóbb tanárok képesek arra, hogy különbséget tegyenek köztük. Ők a tehetséggondozás fizetetlen közkatonái, a szellemi kincskereső tanárok.

Én is ismertem egy ilyen kincskereső tanárt Szegeden. Legendás hírvé fizika szakköre mágnesként vonzotta a diákokat. Pali bácsi szakkörére kiváltságnak számított járhatni. Tanítványai fizikai diákolimpiákat nyertek, és mára magyar és külföldi egyetemeken professzorok. Többen közülük akadémikusok lettek.

Pali bácsit jól ismertem. Nagyon jól ismertem. Gyakran vacsoráztam vele. Nagyon gyakran, merthogy Pali bácsi az Édesapám volt.

Bolyai-díjammal Ő is részese. Alkotó részese, ezért Bolyai-díjamat Édesapám emlékének ajánlom.

TUDOMÁNYOS ÜLÉS KROÓ NORBERT AKADÉMIKUS, AZ MTA FŐTITKÁRA 70. SZÜLETÉSNAJJA TISZTELETÉRE

A tudományos ülést, a rendező osztály részéről *Horváth Zolán* osztályelnök nyitotta meg röviden felvázolva az ünnepelt életútját és köszöntve őt az osztály nevében.

Az osztályelnököt követően *Vizi E. Szilveszter*, az MTA elnöke méltatta az ünnepeltet, többször is idézve Arany Jánost, aki az Akadémia főtitkáráként az ünnepelt elődje volt. Az elnököt követően *Révész Pál* akadémikus köszöntője következett, aki a Matematikai Osztályt képviselte. Őt követte *Kollár János*, az SzFKI igazgatója, *Bárony István*, a Műszaki Fizikai Intézet igazgatója és *Lázár Mária*, az EPS Budapesti Titkárságának vezetője.

Ezek után rövid szünet következett – amely alatt lehetőség nyílt arra, hogy a jelenlévők személyesen keressék meg jókívánásaikkal *Kroó Norbertet* –, majd sor került a tudományos ülésre.

Hat tudományos előadás következett: *Neutronfizikai kutatások a KFKI-ban (Rosta László)*, *A multifotonos folyamatoktól az attosecundumokig (Farkas Győző)*, *Folyadékkristályok átorientálása lézerefénnyel (Jánossy István)*, *Gázlézerek és gázkisülések (Donkó Zoltán)*, *Lézerek mérés-technikai alkalmazásai (Czitrouszy Ala-*



dár), *Fény és élet – orvosi és biológiai lézeralkalmazások (Horváth Zoltán)*.

Az ünnepi ülészak Kroó Norbert köszönő szavaival, majd egy koccintással zárult az első emeleti Tudós Kávézóban.

A MAGYAR SZINKROTRON BIZOTTSÁGRÓL

A tíz éve alakult Magyar Szinkrotron Bizottság a Magyar Tudományos Akadémia és a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal közös bizottsága. Feladata a szinkrotronsugárzással végzett kutatások elősegítése Magyarországon. Ennek érdekében a bizottság

- gondoskodik a szinkrotronsugárzás használatával kapcsolatos információk terjesztéséről;
- szemináriumokat, előadóüléseket, iskolákat szervez;
- kiegészítő pénzügyi támogatást nyújt szinkrotronok mellett folytatott kísérletek mobilitási költségeinek fedezéséhez;
- tanácsadó szerepet tölt be a szinkrotronsugárzás alkalmazásait érintő országos tudománypolitikai döntések kialakításával kapcsolatban.

Az információk terjesztése egyrészt a szinkrotronfelhasználók címlistájára szükség szerinti gyakorisággal (általában évi 5–10 alkalommal) elküldött elektronikus levelekkel, másrészt a bizottság honlapjának frissítésével történik. Az elektronikus levelek főleg pályázati lehetőségekre és külföldi iskolákra, konferenciákra hívják fel a figyelmet, de ily módon történik utalás magyar kutatók szinkrotronsugár-források mellett elért fontosabb eredményeire is. A bizottság honlapja (www.szinkrotron.hu) a közelmúltban kezdte meg működését és – bár még folyamatos fejlesztés alatt áll – máris számos hasznos információt tartalmaz. Segítségével eljuthatunk a világ legfon-

tosabb szinkrotronsugár-forrásainak honlapjaira, könnyen tájékozódhatunk az aktuális nyálábidő-pályázati lehetőségekről, megtalálhatjuk a szinkrotronos kutatói közösséget érintő fontosabb iskolákat stb. Az információk terjesztése időnként nyomtatott kiadványok formájában is történik; ennek egyik példája a Fizikai Szemle jelen száma.

A bizottság előadóüléseit általában más intézményekkel, elsősorban az MTA-val együttműködésben 2–3 éves gyakorisággal szervezi. 2003-ban egy három éves iskolasorozatot indítottunk, amely a szinkrotronsugárzás lehetséges alkalmazásait mutatja be a téma iránt érdeklődő, de a módszert közelebbről még nem ismerő szakemberek számára. A sorozat első iskoláját, amelyre 2003 őszén, Szegeden került sor, az élettudományi alkalmazásoknak szenteltük. 2004 decemberében Budapesten kerül sor az iskola szilárdtestfizikai és anyagtudományi tagjára, 2005-ben pedig a kémiai alkalmazásokat fogjuk bemutatni.

A szinkrotronos méréseken való részvétel esetenként komoly mobilitási kiadásokkal jár. Ezeket a mobilitási kiadásokat a szinkrotronsugár-forrás intézménye gyakran, de nem mindig és nem feltétlenül teljes mértékben megtéríti a kísérlet résztvevőinek. Mivel Magyarország *de facto* tagja a grenoble-i ESRF-nek, az ott végzett kísérletek mobilitási költségét az ESRF – bizonyos kisebb megszorításokkal – fedezi. Ugyancsak jelentős mobilitási támogatásra számíthatnak azok a magyar kutatók, akik

olyan európai nemzeti szinkrotron mellett végeznek kísérleteket, amelyet az Európai Bizottság a 6. Kutatás–Fejlesztési Keretprogram forrásaiból támogat. Ugyanakkor előfordulhat, hogy a méréseket például amerikai vagy japán szinkrotron mellett kell végezni; ilyenkor a résztvevő általában nem számíthat a szinkrotronsugár-forrás intézményének az utazás költségeihez való hozzájárulására. Egyes esetekben európai szinkrotronok mellett végzett kísérletek mobilitási költségeihez is szükséges további hozzájárulás. A Magyar Szinkrotron Bizottság – felhasználva az NKTH által rendelkezésére bocsátott évi 1 millió forintot – pályázati alapon mintegy évi 6–8 esetben tud a kísérletek mobilitási költségeihez kiegészítő támogatást nyújtani. Az 1998 óta fennálló lehetőség igénybe-

vételének módjáról a bizottság honlapján részletes tájékoztatás található.

A Magyar Szinkrotron Bizottság fontos szerepet játszott hazánk ESRF-csatlakozásának előkészítésében. Magyarországnak ma egy többször meghosszabbított, úgynevezett „középtávú megállapodása” van az ESRF-fel, amely a felhasználóknak a teljes jogú tagországok kutatóiével azonos jogokat biztosít. A bizottság évek óta részt vesz egy cseh–lengyel–magyar konzorcium megszervezésében, amely várhatóan néhány hónapon belül meg is fog alakulni. E konzorcium tagjaként már nemcsak felhasználóként, de – korlátozott mértékben – „tulajdonosként” is beleszólhatunk majd az ESRF ügyeibe.

Nagy Dénes Lajos

KÖNYVESPOLC

Carl Sagan: KOROK ÉS DÉMONOK Typotex Kiadó, Budapest, 2000

A nemrégiben elhunyt neves amerikai természettudós utolsó könyvében összefoglalja egész „ars poeticá”-ját, mindazt, ami fontos volt számára és azt, ahogy a világot látta. Mindenekelőtt a természettudomány iránti elkötelezettségét kell kiemelni és azt, hogy milyen hitelesen fogalmazza meg a természettudományos kutatás alapvető jellemzőit. *„A gondosan megtervezett és végrehajtott kísérlet kulcskérdés... Puszta elmélkedéssel nem megyünk sokra.”* „... a versengő hipotézisek közötti választásban a kísérlet mondja ki a döntő szót...” *„A tudomány tévedések sorozatán keresztül balad előre a bibák folyamatos kiküszöbölése útján. A téves következtetéseket nem kerülheti el... Csak olyan hipotézisekkel hajlandó dolgozni, amelyeket megfigyelések útján ellenőrizni lehet.”*

A természettudomány szeretetéből következik életében a tudománynépszerűsítés jelentősége, amelyre a könyvben többször is visszatér. *„Elképzelhetetlennek tartom, hogy ne népszerűsítssem a tudományt. Aki szerelmes, világgá szeretné kürtölni a boldogságát. Én ebben a könyvben teszem közhírré életem szóló szerelmi ügyemet a tudománnyal.”*

Erre szükség is van, mert: *„Napjaink globális civilizációjára úgy van megszervezve, hogy minden lényeges eleme – a transzport, a kommunikáció, a mezőgazdaság, a medicina, az oktatás, a szórakoztatás, a környezetvédelem, sőt a demokrácia működéséhez nélkülözhetetlen választások lebonyolítása is – alapjaiban függ a tudománytól és a technikától, amelyeket azonban a dolgok mai állása szerint szinte senki sem ért. Ez a helyzet felér egy beprogramozott katasztrófával, amelyet ugyan ideig-óráig még elodáztatunk, de a tudatlanság és a hatalom vészjósló keveréke előbb-utóbb belerobban a képünkbe.”*

Részben ez az oka a ma annyira divatos „ufóláznak”, amivel részletesen foglalkozik a könyvben. A fő probléma az, hogy mindehhez: *„Igénylik a tudomány jóváhagyó pecsétjét, de ugyanakkor nem képesek elfogadni a bizonyításoknak azokat a szigorú kritériumait, amelyek ezt a pecsétet bitelessé teszik.”* Részletesen foglalkozik az előző századok boszorkányüldözé-

sével, amely szomorú és elretentő következménye a tudatlanságnak, a vakhitnek és az emberi mohóságának.

A szerző igen magas erkölcsiségről is tanúságot tesz. A más nézetek és más felfogású emberek iránti türelmetlenséget és a háborút elfogadhatatlannak tartja. A politikusoknak igen nagy a felelőssége ezzel kapcsolatban, akik „mesterek” abban, hogy szépítgessék, más szavakkal illessék a háborút és így az emberek előtt elkendőzik a lényegét, hasznot húzva a „hazafias hisztériából”: „rendfenntartás”, „fegyveres beavatkozás”, „megelőző visszacsapás”, „pacifikálás”, „az amerikai érdekek védelme”, „szabadság megóvása” stb. Hangsúlyozza a tudósok felelősségét is: *„... a tudomány embereinek elsődleges kötelezettsége, hogy figyelmeztessenek azokra a veszélyekre, amelyek a tudományból erednek, vagy amelyek tudományos alapon megjósolhatók.”* Éppen ezért keveredett vitába Teller Edével, amint arról részletesen ír a könyvben.

Nem kétséges, hogy a szerző szemlélete alapvetően materialista és általában vallásellenes. *„De miért mondanának ellent a »pszichikus« tapasztalatok annak, hogy az ember semmi másból nem áll, mint anyagból?”* Egy helyen a vallást egyenesen a „szemfényvesztőipar” részének tekinti. Pedig a recenzens szerint érdemes lenne elgondolkozni azon, amit szintén ő állapít meg, hogy a *„... természet mindig kifinomultabb, ravaszabb, elegánsabb, mint ahogy elképzeljük.”* Vagy azon, miért van az, hogy: *„A bit és az ima jótékonyan befolyásolhatja a betegséggel és a kezeléssel együtt járó tüneteket, mérsékelheti a szenvedést, sőt valamivel meg is hosszabbítja az életét.”*

A szerző nagy tisztelettel és szeretettel emlékezik meg szüleitől és azokról, akiktől az egyetemen nagyon sokat kapott. Köztük volt például Fermi és Chandrasekhar is. A köszönetnyilvánítás utolsó mondata valóban megható: *„Tisztában vagyok velem, milyen szerencsés ember vagyok, hogy ugyanabban a személyben találtam tanácsadóra és bírálóra, humorérzékre és bátor képzeletre, aki életem nagy szerelme is.”*

Berényi Dénes

Féken tartott lendület

100 év tapasztalata

A Knorr-Bremse a német mérnök és feltaláló Georg Knorr alapította 1905-ben. Az eltelt 100 év alatt a cég nemzetközi konszernné fejlődött, amely piacvezető a 6 t-nál nagyobb összgerdülő-tömegű haszonjárművek illetve vasúti szerelvények fékrendszereinek piacán. 5 kontinens 25 országában van jelen, 47 leányvállalatán keresztül a világ 60 országával van üzleti kapcsolatban. Foglalkoztatottainak száma közel 11.000 fő. Globálisan integrált K+F tevékenysége révén mintegy 1.200 magasan képzett mérnök dolgozik világszerte a pneumatikus és elektronikus Knorr-fékrendszerek tökéletesítésén.

Forgalma 2003-ban meghaladta a 2,2 milliárd eurót. Ebből a vállalatcsoport közötti járműrendszerek üzletágának értékesítése 2003-ban megközelítette az 1,3 milliárd eurót. Vevői többek között olyan világcégek, mint a DaimlerChrysler, Hino, Iveco, MAN, Navistar, Nissan Diesel, Paccar, Scania, Schmitz Cargobull, és a Volvo/RVI. Rendszerszállító, ami sikerének alapja. Termékpalettája felöleli egy jármű fékrendszerének minden elemét, a sűrített levegő előállítás és előkészítés szerelvényeitől a fékvezérlésen keresztül a pneumatikus működésű tárcsafélig és a segédberendezésekig, illetve az új fejlesztésű elektronikus rendszerekig (ABS/ASR, EBS). Európában a foglalkoztatottak létszámát tekintve az egyik legnagyobb a csoport magyarországi vállalata, a Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft.

A vállalat már 1970-ben ekkor még SZIM gyárként gyártott pneumatikus fékszelepeket Knorr-licenc alapján. Mára a kecskeméti gyár a vállalatcsoporton belül a pneumatikus fék-, felfüggesztési és segédrendszerek fejlesztési és gyártó központjává vált. A közel 700 főt foglalkoztató vállalat a saját gyártású termékek értékesítése mellett a Knorr-Bremse teljes termékpalettájával látja el a legnagyobb hazai haszonjármű gyártókat (RÁBA, Schwarzmüller, NABI, Kravtex) és pótkatrész piaci partnereken kívül a kelet- és délkelet-európai piacokat is.

Értékesítése 2003-ban meghaladta a 13,6 milliárd forintot, amelynek 93%-a exportra került. Számos kiváló minőségű Knorr-Bremse termék és rendszer kerül egyre nagyobb számban beépítésre a régió olyan nagy járműgyártói, mint a PAZ, MAZ, KAMAZ, LiAZ, LAZ, AZUral, ROMAN, Ikarbus haszonjárműibe.

A vállalat összes munkafolyamata az üzleti kiválóságra törekvő, folyamatos és magas színvonalú minőségbiztosításra alapozódik.

A cég korábban QS9000 szerint tanúsított minőségbiztosítási rendszere 2001-ben kibővült az ISO TS16949 tanúsítvánnyal is. 1998-ben a vállalat elnyerte a Nemzeti Minőségdíjat közép vállalat kategóriában, 2004-ben pedig a Knorr-Bremse közúti haszonjármű rendszerek üzletága lett döntős a legkiválóbban vezetett európai vállalatoknak járó Európai Üzleti Kiválóság díjon. A vállalat működése során nemcsak a környezet megővására törekszik, de vevőinek is környezetbarát termékeket kínál. Átfogó környezetvédelmi menedzsment rendszert működtet, és rendelkezik az ISO 14001-nek megfelelő környezetvédelmi rendszer-tanúsítvánnyal is.

A cég a kezdetektől fogva nagy hangsúlyt helyez a K+F tevékenységre, az innovációra, illetve az új termékek kifejlesztése mellett a szelepek javítására, felújítására is. Több évtizedes fejlesztési és gyártási know-how-jának köszönhetően a mechanikai szerkezetek, a pneumatika, valamint az elektronika területén egységes rendszerfilozófiát követő, komplett rendszer programot ajánl a vevők igényeinek minél szélesebb körű kielégítése érdekében. Kutatásfejlesztési tevékenység Magyarországon 1995-ben indult.



1999-ben megépült a Knorr-Bremse budapesti Kutatási és Fejlesztési Központja, s ma már több mint kilencven, magasan képzett mérnök foglalkozik Budapesten az elektronikus rendszerek, Kecskeméten pedig a pneumatikus, elektro-pneumatikus berendezések tervezésével és vizsgálatával. Az ő munkájuk eredménye többek között a motoros járművek és pótkocsik elektronikus fék- és menetdinamikai stabilizáló rendszerei (EBS, TEBS, ESP, RSP), ezek pneumatikus és elektro-pneumatikus szerelvényei illetve az olyan új technológiák meghonosítása, mint a műanyagok és kerámiák alkalmazása.

A TEBS (Pótkocsi Elektronikus Fékrendszer) termékcsoport kifejlesztéséért és a hozzá tartozó kompetencia felépítéséért a vállalatot 2001-ben a Gazdasági Minisztérium Ipari Innovációs Díjával is kitüntették.

A vállalat K+F tevékenységének eredményességéhez meghatározó mértékben járult hozzá a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemmel folytatott szoros és szerteágazó együttműködés az oktatás és a közös kutatás és fejlesztés területén, aminek egy újabb állomása a biztonságkritikus jármű és járműirányítási rendszerek kutatásával foglalkozó közös laboratórium létrehozásáról szóló megállapodás.

