

fizikai szemle

2014/9

MAGYAR TUDÓSOK ÉS MŰVÉSZEK SZÜLŐHÁZA

- akik Nyugaton alakították a 20. század történelmét és kultúráját

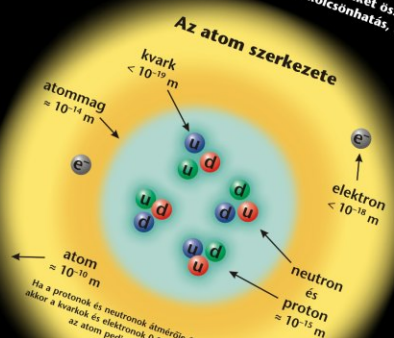
Z ELEMÍ RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK

Standard Modellje

Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legfontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektromágneses kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.

Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legfontosabb ismereteinket összegzi a Standard Modell, amely az erős és egyesített elektromágneses kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard Modellnek.

leptonok (spin = 1/2)	tömeg GeV/c ²	elektromos töltés
elektron	< 10 ⁻⁶	0
muon	0,000511	-1
tauon	< 0,0002	0
neutrínó	0,106	-1
...	< 0,02	0
...	1,7771	-1



Bozonok - a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2...

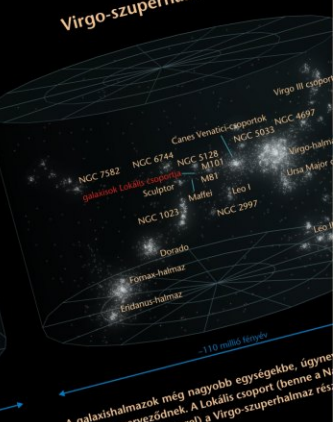
erős - a kölcsönhatások közvetítői	jel/név	tömeg GeV/c ²	elektromos töltés
gluon	g	0	0

elektromágneses	jel/név	tömeg GeV/c ²	spin
photon	γ	0	1
W boson	W	~80	1
Z boson	Z	~90	1

A kölcsönhatások tulajdonságai

kölcsönhatás	alapvető	erős	gyenge
gravitáció	szintöltés	viszamaradó	gyenge
elektromágneses	kvarkok, gluonok	lásd magyarázat	gyenge
erős	gluonok	hadronok	mezők
gyenge	25	60	

HELYÜNK A VILÁGEGYETEMEN



A szabad szemmel látható csillagok - a Tejútrendszer tagjai. A Tejútrendszer spirális galaxis: a csillagok zóna a csillagközi anyag nagy részével együtt spirális karok mentén tömörül. Becslések szerint a Tejútrendszer 200 milliárd csillag alkotja.

A galaxisok túlnyomó többsége nem elszórtan helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxissal együtt. E csoport meghatározó tagjai a Tejútrendszeren kívül az Andromeda-kód (M31) és a Triangulum-kód (M33) - mindhárom spirálgalaxis. Mellékletük számos szabálytalan és ellipszoidális törpegalaxis alkotja a Lokális csoportot.

ENERGIA-HÁZTARTÁSA

A Föld energia-háztartása bolygósúlyban lévő rendszert írja le, egy légkört érő, valamint az onnan távozó hőmennyiségeket. Ezek lehetnek sugárzásból (fény és hő) - értékeit a CERES műhold méri fel. A Föld felszínéről a légkör felé történő hőátvitel két módon történhet: hősugárzás és hővezetés. A hősugárzás az infravörös tartományban történik, mint az infravörös sugárzásból származó hő.

A Napenergia a Föld felületére a légkörön át érkezik, majd a felszínre kerül. A felszín által visszavert energia a légkörön át visszajut a Földre, ami a légkör felmelegítéséhez vezet. A légkör által kibocsátott energia a felszínre kerül, ami a Föld felmelegítéséhez vezet.

a légkör által elnyelt	77 W/m ²
a felszín által visszavert	23 W/m ²
infravörös kisugárzás	239,7 W/m ²
a légkör által kibocsátott	170 W/m ²
a légkör által elnyelt	358 W/m ²
légköri ablak	40 W/m ²
felhők által kibocsátott	30 W/m ²

POSZTEREINKET KERESD A FIZIKAISZEMLE.HU MELLÉKLETEK MENÜPONTJÁBAN!

A poszterek szabadon letölthetők, kinyomtathatók és oktatási célra, nonprofit felhasználhatók. Kereskedelmi forgalomba nem hozhatók, változtatás csak a Fizikai Szemle engedélyével lehetséges. A kirakott poszterekről fényképet kérünk a szerkesztok@fizikaiszemle.hu címre.

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat
havonta megjelenő folyóirata.**

**Támogatók: a Magyar Tudományos
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,
az Emberi Erőforrások Minisztériuma,
a Magyar Biofizikai Társaság,
a Magyar Nukleáris Társaság
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete**

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

http://www.fizikaiszemle.hu



A címlapon:

**A 828 m magas Burdzs Kalifa
felhőkarcolót már megvilágítja a felkelő
Nap, míg környezete még sötétben van.
(Fotó: Hajas János,
www.panoramio.com/user/hajas)**

TARTALOM

<i>Major Balázs, Horváth Zoltán, Kovács Attila Pál, Bor Zsolt:</i> A fényelhajlás Young-féle elmélete és annak alkalmazása az ultrarövid fényimpulzusok diffrakciójakor – a szélhullám-impulzus	294
<i>Rácz Judit, Nándori István:</i> Lázterápia mágneses nanorészecskékkel	298
<i>Janosov Milán, Kozma Péter:</i> A jelölésmentes bioérzékelés modern eszközei	304
<i>Németh Gergely, Klupp Gyöngyi, Kovács Éva, Pekker Sándor,</i> <i>Kamarás Katalin:</i> Kubán-fullerén kokristályok fázisátalakulásának infravörös spektroszkópiás vizsgálata	310
<i>Uray László:</i> Kései megemlékezés Somogyi Antalról	312

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Oláb Éva Mária:</i> Részecskefizika tanítása a kutatólaborban	317
<i>Stonawski Tamás:</i> Felhők magasságának mérése	320
<i>Tasi Zoltánné:</i> A fizika az életünk része	324

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>B. Major, Z. Horváth, A. P. Kovács, Zs. Bor:</i> Young's theory of light diffraction and its application to extremely short light pulses. The boundary wave impulse	
<i>J. Rácz, I. Nándori:</i> Hyperthermia using magnetic nanoparticles	
<i>M. Janosov, P. Kozma:</i> Modern devices for accomplishing biosensing without marking	
<i>G. Németh, Gy. Klupp, É. Kovács, S. Pekker, K. Kamarás:</i> Infrared spectroscopy used to study phase changes in cubane-fullerene co-crystals	
<i>L. Uray:</i> A late obituary: Antal Somogyi	

TEACHING PHYSICS

<i>É. M. Oláb:</i> Teaching particle physics in the research laboratory	
<i>T. Stonawski:</i> The measurement of cloud height	
<i>Z. Tasi:</i> Physics – part of our lives	

EVENTS

<i>B. Major, Z. Horváth, A. P. Kovács, Zs. Bor:</i> Youngs Theorie der Lichtbeugung und ihre Anwendung auf ultrakurze Blicke. Der Impuls der Wellenränder	
<i>J. Rácz, I. Nándori:</i> Hyperthermie mit magnetischen Nanoteilchen	
<i>M. Janosov, P. Kozma:</i> Moderne Elemente der Bio-detektoren	
<i>G. Németh, Gy. Klupp, É. Kovács, S. Pekker, K. Kamarás:</i> Infrarot-Spektroskopie in der Anwendung zum Studium der Phasenänderungen in Cubane-Fullerene Ko-Kristallen	
<i>L. Uray:</i> Ein später Nachruf: Antal Somogyi	

PHYSIKUNTERRICHT

<i>É. M. Oláb:</i> Unterricht über Elementarteilchen im Forschungslabor	
<i>T. Stonawski:</i> Die Messung von Wolkenhöhen	
<i>Z. Tasi:</i> Physik: ein wesentlicher Teil unseres Lebens	

EREIGNISSE

<i>Б. Майор, З. Хорват, А. П. Ковач, Ж. Бор:</i> Теория Янга о диффракции света и её применение к сверхкоротким импульсам. Импульс края волн	
<i>Ю. Рац, И. Нандори:</i> Создание лихорадочных температур системов наночастиц	
<i>М. Яношов, П. Козма:</i> Современные способы био-обнаружения без меток	
<i>Г. Немет, Г. Клупп, Э. Ковач, Ш. Пеккер, К. Камараш:</i> Применение инфракрасной спектроскопии для изучения фазовых изменений ко-кристаллов кубана и фуллерена	
<i>Л. Урай:</i> Запоздальный некролог: Антал Шомоди	

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

<i>Э. М. Олах:</i> Обучение физике частиц в самой исследовательской лаборатории	
<i>Т. Стонаковский:</i> Измерение высоты облаков	
<i>З. Таси:</i> Физика – действительная часть нашей жизни	

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



A FÉNYELHAJLÁS YOUNG-FÉLE ELMÉLETE ÉS ALKALMAZÁSA AZ ULTRARÖVID FÉNYIMPULZUSOK DIFFRAKCIÓJAKOR – A SZÉLIHULLÁM-IMPULZUS

Major Balázs, Horváth Zoltán, Kovács Attila Pál, Bor Zsolt
Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

A fizikai folyamatok egy igen fontos csoportját alkotják a hullámjelenségek, hiszen mind a fény, mind a hang – amelyek az ember számára környezetéről a legfontosabb információközvetítőként szolgálnak – hullámtermészettel bírnak. A hullámtermészet egyik legfontosabb bizonyítéka a hullámok elhajlása, vagy idegen szóval diffrakciója. Ezzel az elnevezéssel hétköznapi értelemben azt a tapasztalást illetjük, hogy a hullámok bejutnak a szabad terjedést gátló akadályok mögé is. Másképp úgy is megfogalmazható, hogy bizonyos esetekben a hullámok egyenes vonalú terjedésétől eltérő viselkedést tapasztalunk annak ellenére, hogy a vizsgált tartományon a hullám terjedési sebessége mindentűn ugyanakkora. A fény(hullámok) esetében ez a jelenség a hétköznapiakban csak ritkán figyelhető meg, hiszen az elhajlás mértéke az „elhajló” hullám hullámhosszának és a diffrakciót okozó tárgy méreteinek viszonyától függ, és a fény néhány száz-nanométeres hullámhosszaihoz mérten a környezetünkben található tárgyak nagyságrendekkel nagyobbak. Optikai tartományban ez a jelenség egy fizikaórai kísérletben akkor demonstrálható, ha egy monokromatikus (egyszínű), párhuzamosított fényel, például egy folytonos üzemi lézerrel egy néhány száz mikrométer átmérőjű kör alakú nyílást világítunk meg. Ekkor nem csak azt tapasztalhatjuk, hogy a rés mögötti ernyő nagyobb területén látunk fényjelenséget, mint maga a rés, de még azt is, hogy az elhajlás eredményeként az ernyőn nem egy fényes, éles határral rendelkező folt jelenik meg, hanem koncentrikus világos és sötét körök váltják egymást. Amennyiben egy, az előzővel komplementer esetet vizsgálunk, és rés helyett egy megfelelő méretű kör alakú „lapot” világítunk meg, akkor a körlap árnyékterének közepén, a kialakuló diffrakciós kép középpontjában világos foltot láthatunk (Poisson–Arago-folt) pont ott, ahol a fény egyenes vonalú terjedését feltételezve legkevésbé várnánk. Mindkét esetben jellemző tehát, hogy a fény az úgynevezett geometriai árnyéktérbe is bejut, ahova a geometriai optika szabályai szerint nem lenne lehetséges. Kicsit hétköznapiabb példákat tekintve, e jelenségnek köszönhető például az, hogy a rádióhullámok azon földrajzi területekre is eljuthatnak, amelyeket a forrást jelentő adótornyoktól

több száz méter magasságú hegyek választanak el. De jól példázza az is, hogy a hajók vagy földrengések által keltett vízhullámok a kikötők és öblök olyan részeibe is behatolnak, amit a gátak vagy (fél)szigetek a hullám forrásától eltakarnak.

A fényelhajlás hullámoptikai leírása – történeti áttekintés

A fényelhajlás jelenségének leírására használt legismertebb elmélet alapjait *Christiaan Huygens* holland fizikus fektette le és publikálta 1678-ban. Huygens gondolatait később *Augustin-Jean Fresnel* francia mérnök egészítette ki az interferencia elméletével, ami a hullámtermészet másik legfontosabb vejejárója. Fresnel 1818-ban megjelentetett memoárjában publikálta a kiegészített elmélet azon a formáját, amit ma Huygens–Fresnel-elvnek nevezünk. Ez az elv kimondja, hogy hullámterjedés során a hullámfront minden egyes pontja elemi hullámforrásnak tekinthető, és egy tetszőleges térbeli pontban egy későbbi időpillanatban tapasztalható jelenséget ezen elemi hullámforrások interferenciája határozza meg. Ez a formalizmus – néhány további alapfeltevést bevezetve – minden akkor tapasztalt diffrakciós jelenséget képes volt nemcsak kvalitatív, de kvantitatív módon is megmagyarázni. Ennek köszönhetően néhány évtizeddel később, 1882-ben *Gustav Kirchhoff*nak sikerült az elvet precíz, bár nem teljesen konzisztens matematikai formába önteni.

A Fresnelnek tulajdonított, teljesnek tekintett leírás azonban nem az első volt azon elméletek közül, amelyek az elhajlás jelenségének hullámelméleten alapuló magyarázatát adták. *Thomas Young* angol orvos és fizikus, néhány évvel Fresnel előtt, már 1802-ben publikálta a résen való elhajlásra vonatkozó saját elképzeléseit. Azonban Young megközelítése gyorsan feledésbe merült egyrészt azért, mert kvantitatív leírást nem tett lehetővé, másrészt később, 1819-ben, maga Young is jobbnak tekintette Fresnel teóriáját sajátjáénál. Thomas Young elmélete szerint az elhajlást okozó tárgy mögötti térben tapasztalt jelenségek két forrásból származó hullámok interferenciájaként jönnek létre. Az egyik hullám a résen akadályoztatás nélkül átjutó geometriai hullám, a másik a rés széléről divergáló hullám, amit napjainkban már *szélihullám* elnevezéssel illetnek. Leírása egyébként még *Isaac Newton* azon megfigyelésén alapult, hogy a vizsgálat részét képező rés széle „világít”, és így az a fény forrásaként szolgál. A felvetés matematikai

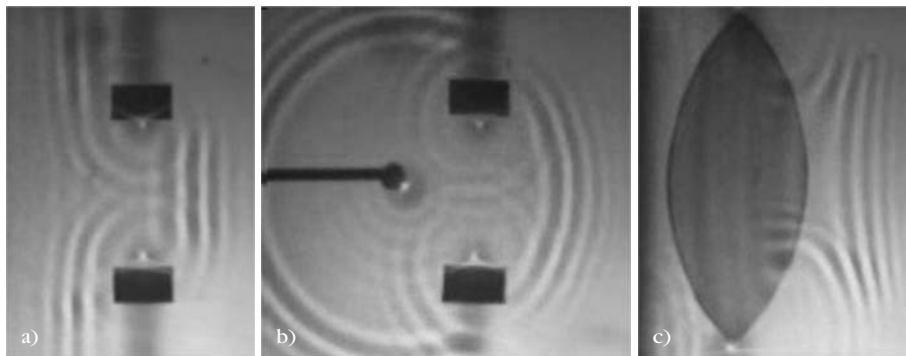
Major Balázs munkája a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai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

megfogalmazását az elemibbnek tekinthető, zavar nélkül továbbterjedő geometriai hullám tette nehezkessé, hiszen ez a hullámter folytonosságának megszakadását jelenti a geometriai árnyék és fény határán. A parciális differenciálegyenletekkel való matematikai leírásban az ilyen folytonosságbeli szakadások létjogosultságához minden esetben valamilyen fizikai indoklás szükséges, azonban ez esetben ilyen magyarázat nem adható. Így érthető, hogy a matematikai formalizmus kialakítása során Kirchhoff miatt Fresnel megközelítését vette alapul.

Bár Young leírása majd egy évszázadra feledésbe merült, a 19. század végén újból felfigyeltek rá. 1896-ban az akkori Kelet-Poroszországban *Arnold Sommerfeld* egy elektromágneses diffrakációs jelenség szigorúan a Maxwell-egyenleteken alapuló, elektrodinamikailag pontos megoldását adta. Sommerfeld megoldása pedig Young elméletével egybecsengő eredményt mutatott, a kapott megoldás két hullámra volt bontható: egy, a bejövő hullám zavartalan tovaterjedéséből adódó geometriai hullámra és egy, az ernyő széléről származó hullámra. Mivel Sommerfeld levezetése az elektrodinamika alapegyenletein alapult, így megoldásában a geometriai árnyék határán szakadás természetesen nem jelent meg, hiszen az elektromos és mágneses források jelenlétét feltételezte volna, ami a diffrakció jelensége esetén fizikailag nem indokolható. Young elképzelése tehát helyesnek bizonyult, a problémát jelentő „szakadásokat” pedig a számolások alapján a diffrakciót okozó akadályról divergáló szélhullámok „kisimítják” [1]. Ezen felismerés alapján később, a 20. század elején *Wojciech Roubinowicz*, majd a 20. század közepén *Emil Wolf* és munkatársai a Kirchhoff-formalizmusnak is olyan „transzformációt” találtak, amely a hullámter felbontásának azt a formáját adta, ami a Young-elmélet helyességét bizonyította (Marchand–Wolf- és Miyamoto–Wolf-elméletek) [2].

A szélhullám fizikaórai kísérletekben

A Young-féle megközelítés fontosságát Emil Wolf és kollégái már az 1960-as években felismerték. Jelentősége egyszerűségében rejlik: amennyiben az elhajlási jelenségeket és kísérleti megfigyelésüket Young gondolatmenetének ismeretében vizsgáljuk, néhány érdekes megfigyelés olyan egyszerű magyarázatát kaphatjuk, amelyek Fresnel elmélete alapján nehezebben magyarázhatók. A jobb szemléltetés érdekében tekintsünk víz hullámokat és egy rést, azaz két akadályt, amelyek között a hullámok akadályoztatás nélkül továbbjuthatnak (1.a és 1.b ábrák). Young elképzelése szerint ebben az esetben látszólag három hullámforrást figyelhetünk meg: a valódi hullámforrást és a



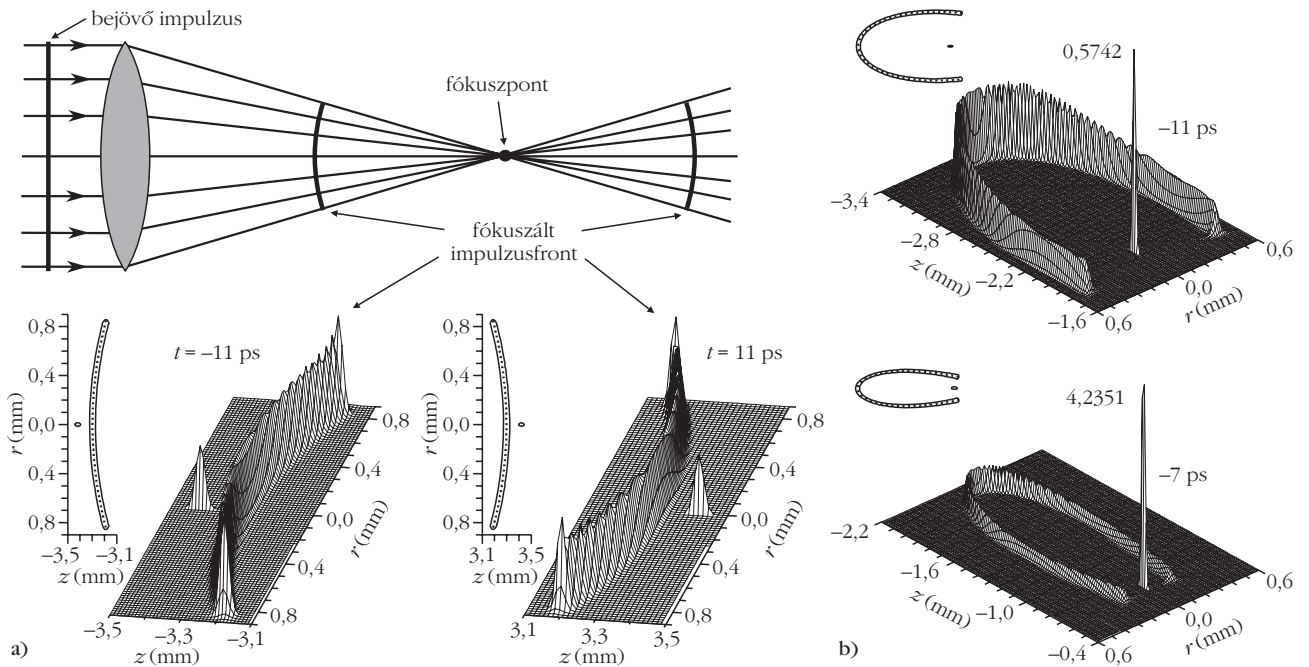
1. ábra. A szélhullámok kísérleti szemléltetése víz hullámok segítségével (a) sík hullámforrás és rés, (b) pontszerű hullámforrás és rés, valamint (c) sík hullámforrás és lencséző elem használatával. További képek: [3].

rés két szélét. Az 1. ábrán látható, hogy az egyszerű hullámkádban végzett kísérlet során éppen ez tapasztalható mind sík- (1.a ábra), mind pontszerű hullámforrás (1.b ábra) esetén: az akadály széleiről, mint pontszerű forrásokból, kört formázó hullámfrontú szélhullámok indulnak ki. Amennyiben a látható elhajlási jelenséget Fresnel elméletével próbálnánk elemezni, sokkal nehezebben lehetne kikövetkeztetni, hogy miért ilyen a hullámter megjelenése.

A szélhullámok természetesen nem csak egy egyszerű nyíláson/apertúrán való áthaladás esetén jelennek meg. Mivel a fókuszáláshoz használt lencsék maguk is apertúraként viselkednek, a lencse széleiről is szélhullámok indulnak ki. Ahogy az a víz hullámok elhajlását szemléltető kísérleteket bemutató 1.c ábrán is látható, egy a kád aljára helyezett lencse alakú üveglap fókuszáló elemként működik, hiszen a víz kisebb mélysége okán a víz hullám terjedési sebessége az üveglap felett a kád többi részében tapasztaltnál kisebb értékű. E „lencse” széle, ahogy Young elmélete sugallja, körhullámok forrásaként szolgál.

A szélhullám-elmélet megjelenése napjaink fizikai kutatásaiban

Az eddigiek alapján felmerülhet az a gondolat, hogy Young elméletének vizsgálata lezártnak tekinthető, hiszen létjogosultsága már évtizedekkel ezelőtt bebizonyosodott, és Fresnel elméletével összevetve nem hordoz sok újdonságot. Ez azonban tévedés, ugyanis a szélhullám-elmélet az utóbbi években is jelentős érdeklődésre tart számot. Ennek magyarázata, hogy a Young-elméletből könnyen kikövetkeztethető szélhullámok jelenléte nem csak a fizikaórai kísérletekben mutatható ki, de akár az ultrarövid lézerpulzusok esetén is megfigyelhető, amelyek jelenleg sok fizikai kutatás fontos eszközét jelentik, és a Szegedi Tudományegyetemen (SZTE) is kiemelt kutatási témát jelentenek. A korábban példaként felhozott fókuszálás esete azért is érdekes, mert az ultrarövid fényimpulzusok esetében a szélhullám jelenlétére éppen a fókuszálás vizsgálata hívta fel a figyelmet. Ugyanis a több mint egy évtizeddel ezelőtt az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén végzett, Kirchhoff



2. ábra. A szélhullám-impulzus megjelenése homogén, intenzitáseloszlású femtoszekundumos impulzus fókuszálásakor. (a) Jól látható, hogy a szélhullám-impulzus a fókuszpont előtt a geometriai impulzus mögött, míg a fókuszpont után a geometriai impulzus előtt halad. (b) A szélhullám jelenlétére a fókuszálás során befűződő impulzusfrontot létrehozó kromatikus hiba vizsgálata hívta fel a figyelmet [4].

formuláin alapuló számítások, amelyek femtoszekundumos lézerpulzusok fókuszálására irányultak, első ránézésre meglepő eredményre vezettek [4] és számos, a tanszékhez kötődő fontos kutatási eredményt indukáltak. A meglepő jelenség az volt, hogy egy homogén intenzitáseloszlású nyáláb leképezési hibáktól (aberrációktól) mentes, ideális lencsével történő fókuszálásakor a geometriai optikával összhangban lévő impulzusfront mögött az optikai tengelyen egy másik impulzus is megjelent, amelynek időbeli lefutása megegyezett a geometriai impulzussal (2. ábra).

A meglepő második impulzus tulajdonságait megvizsgálva később kiderült, hogy az nem lehet más, mint a nyílás széleiről elhajló hullámok interferenciájának eredménye, azaz a szélhullámok ilyen formában történő megjelenése. Így kapta az új impulzus a „szélhullám-impulzus” elnevezést, és így adódott a felfedezés, ami ebben az esetben az elhajlás Young-elméletére terelte a figyelmet.

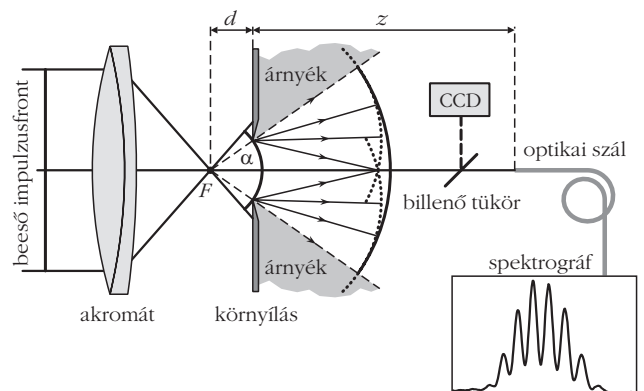
Kicsit belemélyedve a szélhullám-impulzus jellemzőibe, először furcsa tulajdonságra figyelhetünk fel. A 2.a ábrán jól látható, hogy a fókuszpont után a szélhullám-impulzus már a geometriai impulzusfront előtt halad, szemben a fókuszpont előtti esettel, amikor a geometriai impulzus mögött található. Ez arra enged következtetni, hogy a szélhullám-impulzus a fókuszponton való áthaladás során megelőzi a fénysebességgel haladó geometriai impulzust. Valóban, a számítások megmutatták, hogy a szélhullám-impulzus sebessége az optikai tengely mentén a $c/\cos\alpha$ összefüggés szerint változik, ahol c a fénysebesség és α az a szög, ami alatt az optikai tengely adott pontjából a lencse széle látszik. Ez azt jelenti, hogy (egyetlen háttérset kivételével) a szélhullám-impulzus végig a

fénysebéségnél nagyobb sebességgel halad. Habár ennek hallatán elsőre kételkedhet az ember a számolás helyességében, könnyen belátható, hogy ez nem sérti a speciális relativitáselmélet axiómáit. Ugyanis a szélhullám-impulzus a rés széleiről terjedő hullámok konstruktív interferenciájának eredményeként jön létre, és ezek az interferáló hullámok mind fénysebességgel terjednek. Az, hogy az interferencia miatt kialakuló szélhullám-impulzus a fénysebéségnél gyorsabban halad, csak abból adódik, hogy a konstruktív interferencia helye ilyen módon változik.

A szélhullám-impulzus kísérleti demonstrálása

Young elméletének ultrarövid impulzusok fókuszálási modelljében történő megjelenése után a kísérleti demonstrálás sem váratott magára sokáig. Bár az első,

3. ábra. A szélhullám-impulzus kimutatásához használt kísérleti elrendezés [5].



Szegeden végzett kísérleti eredmények csak közvetettek voltak, egyértelmű bizonyítékait jelentették a homogén intenzitáseloszlású nyalábok résen történő elhajlásakor megjelenő szélhullám-impulzusnak.

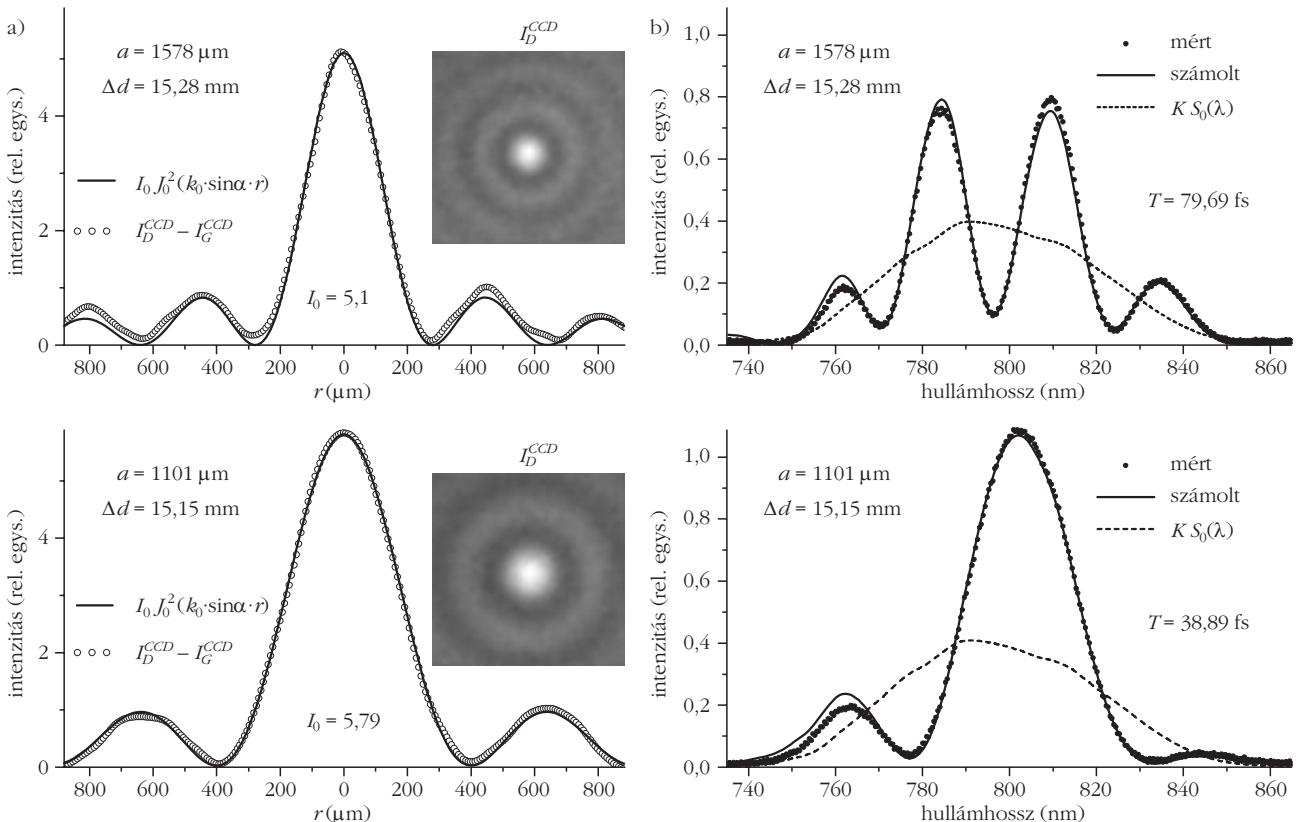
A 3. ábrán látható kísérleti elrendezéssel egy divergens gömbhullám elhajlását egy optikai szál spektrográffal és CCD-kamerával vizsgáltuk. A kísérlet során az optikai szál belépési síkját eltolóval mozgattuk az optikai tengely mentén. A korábbi elméleti leírásnak megfelelően a 4.a ábrán látható, CCD-kamerával készített felvételek már utaltak a szélhullám jelenlétére, hiszen azokon a homogén háttérre ráakadó nulladrendű Bessel-függvény négyzetével (J_0^2) leírható gyűrűrendszernek megfelelő intenzitáseloszlás látható. Ez egyértelmű jele annak, hogy két különböző forrásból származó hullám interferenciájáról van szó. A szélhullám-impulzus egy másfajta kimutatása a spektrográfus mérésekkel történt. Ahogy a 4.b ábrán is látható, a spektrális mérések a fényforrás spektrumának modulációját mutatták (az ábrán a fényforrás spektruma szagatott vonallal van ábrázolva, a modulált spektrumot pedig pontok jelölik). A spektrális moduláció annak a jele, hogy két, időben egymást követő impulzus halad a mérési pont helyén, azaz az optikai tengely mentén. A moduláció periódusa a követési távolsággal áll összefüggésben: minél ritkább a moduláció, időben annál közelebb vannak egymáshoz az impulzusok. Az egyes helyeken a két impulzus közötti időközés eltérő, így a spektrum modulációja változik a szál mozgásakor. A 4.a és 4.b ábrák grafikonjain látható folytonos vonallal

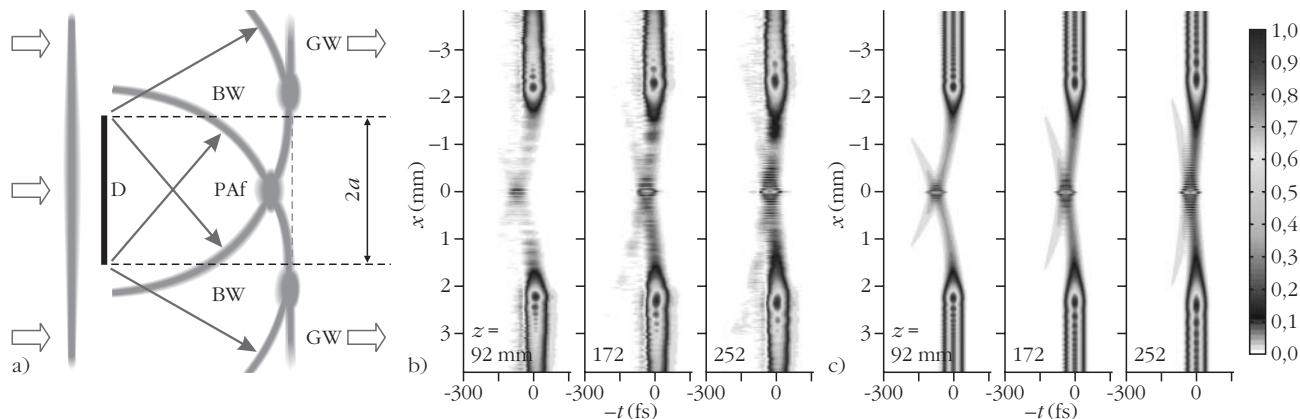
ábrázolt görbék a kísérleti paraméterekkel végzett számolások eredményei, amelyek a mérési eredményekkel igen jó egyezést mutattak.

A szélhullám-impulzus kimutatása azonban nem csak közvetett módon lehetséges. Egy néhány évvel ezelőtt, Rick Trebino és munkatársai által kifejlesztett mérési módszer képes az elektromos térerősség nagy tér- és időbeli felbontású vizsgálatára [6]. A módszerben rejülő lehetőségek egyik első demonstrálása éppen a Young-elmélet különböző diffrakációs jelenségekben való megjelenésének vizsgálata volt. Az 5. ábrán például egy kör alakú lapon történő elhajlás kísérleti eredményei láthatók. A mérések az optikai tengelyre merőleges síkokban, az elhajlást okozó akadálytól mért különböző távolságokban történtek. A kísérlet körszimmetriája miatt a vizsgálat csak egyetlen térbeli dimenzióra szorítkozott.

Az ábrákon jól látható, hogyan halad a geometriai impulzus által el nem érhető tartományban, az optikai tengely mentén, a szélhullámok interferenciájaként létrejövő impulzus. A kísérleti és számolási eredmények ez esetben is szép egyezést mutattak, és az ábrák jól szemléltetik, hogy fokozatosan miként éri utol a szélhullám-impulzus a geometriai impulzusfrontot. Az 5. ábrán látható kísérlet egyébként a monokromatikus hullámoknál megfigyelhető Poisson–Arago-foltnak is megfelelője, hiszen a szélhullám-impulzus miatt az optikai tengelyre merőleges síkokban a körlap árnyékterének közepén fényjelenség tapasztalható. A méréseket környítés esetében is elvégezték. Sőt bonyolultabb esetekben, annulá-

4. ábra. Az (a) és (b) ábrák két-két kísérleti eredményt mutatnak. Az (a) jelű ábrákon az optikai tengelyre merőleges síkban készített CCD-kamerás felvétel látható két különböző esetben, a (b) jelű ábrákon pedig az optikai tengelyen mért spektrum [5].





5. ábra: A körlapon történő elhajlás kísérleti vizsgálata. Az (a) ábra szemlélteti a kísérlet sematikus vázlatát, a geometriai hullám (GW), a szélhullám (BW) és a Poisson–Arago-folt (PAf) megjelenését a D körlemezen való elhajlás során. A (b) ábrán a mért, míg a (c) ábrán számolt térerősség időbeli lefutása látható három különböző, az optikai tengelyre merőleges síkban [6].

ris rések, valamint összetettebb résformáknál is ellenőrizték az elmélet helyességét. A számolási és kísérleti eredmények minden esetben szép egyezést mutattak, és példázták a hullámtermészet talán legfontosabb bizonyítékát, a hullámok elhajlása jelenségét.

Konklúzió

A felvázolt elméleti és kísérleti eredmények mind egyértelműen demonstrálják, hogy Young fényelhajlással kapcsolatos elmélete teljes mértékben megállja helyét. Bár Fresnel megközelítése szélesebb körben alkalmazható az elhajlási jelenségek tárgyalásakor, bizonyos esetekben Young megközelítésével a tapasztalatok könnyebb interpretációja adódik, és matematikai kezelése is egyszerűbbé válik (felületi integrálok helyett elégséges a rés pereme mentén értelmezett vonalintegrálok kiszámítása). A bemutatott eredmények nem csak a hullámtermészet egy szép példáját mutatják, de ezek alapján levonható az a következtetés is, hogy Fresnel

és Young elmélete teljes mértékben ekvivalens. Tehát végső soron egyik elmélet sem tekinthető a másikkal szemben felsőbbrendűnek, és ez az eset jól mutatja, hogy pusztán az első nehézségek miatt nem feltétlenül elvetendő egy-egy új megközelítés.

Irodalom

1. A. Rubinowicz: Thomas Young and the Theory of Diffraction. *Nature* 180 (1957) 160–162.
2. E. W. Marchand, E. Wolf: Boundary Diffraction Wave in the Domain of the Rayleigh–Kirchhoff Diffraction Theory. *J. Opt. Soc. Am.* 52 (1962) 761–763.
3. További képek és videók hasonló kísérletekről az SZTE OKT munkatársai által készített digitális tananyagokban: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~ophome/optics/indexh.html>
4. Horváth Zoltán: *Femtosekundumos fényimpulzusok fókuszálása*. Kandidátusi értekezés, JATE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged, 1997.
5. Z. L. Horváth, J. Klebniczki, G. Kurdi, A. Kovács: Experimental investigation of the boundary wave pulse. *Opt. Commun.* 239 (2004) 243–250.
6. P. Saari, P. Bowlan, H. Valtna-Lukner, M. Löhmus, P. Piksarv, R. Trebino: Basic diffraction phenomena in time domain. *Opt. Express* 18 (2010) 11083–11088.

LÁZTERÁPIA MÁGNESES NANORÉSZECSEKÉKKEL

Rácz Judit,^{1,2} Nándori István^{2,3}

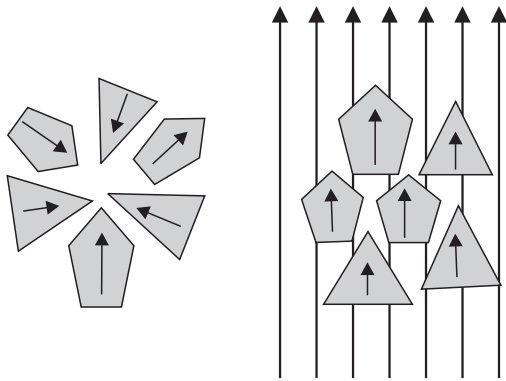
¹Debreceni Egyetem

²MTA Atomki, Debrecen

³MTA–DE Részecskefizikai Kutatócsoport

Jelen írásban egy olyan kutatási terület debreceni vonatkozású eredményeivel szeretnénk megismertetni az Olvasót, ahol az elméleti fizika eszköztárát használjuk egy orvosbiológiai alkalmazás céljából. A mágneses tulajdonsággal rendelkező nanoméretű kristályok (mágneses nanorészecskék) segítségével végzett „lázterápia”, azaz hyperthermia napjaink egyik legfontosabb, megoldásra váró orvosi problémájához, a daganatos elváltozások kezeléséhez szolgáltat kiegészítő terápiás eljárást az eddig alkalmazott módszerekhez. A hyperthermia olyan alternatív da-

ganatkezelési módszer, amely azon alapul, hogy magas hőmérséklet hatására bizonyos tumorsejtek elpusztulnak, illetve fokozottan érzékennyé válnak a kemoterápiás és a sugárterápiás kezelésekre. A szervezetbe juttatott mágneses nanorészecskék a külső gerjesztő tétől energiát vesznek fel és azt a környezetüknek adják le, ezáltal lokálisan és kontrollált módon emelhető a hőmérséklet az emberi szervezetben. A kutatómunkánkban azt vizsgáljuk, milyen feltételek mellett lehetne hatékonyabbá tenni ezt a hőtermelést.



1. ábra. Az egy-doménes mágneses nanorészecskék beállnak a külső gerjesztő tér irányába [1].

Bevezetés

A mágneses nanorészecskék jellemző módon olyan nanoméretű egykristályok, amelyek ferromágneses tulajdonsággal rendelkeznek (azonban a Curie-hőmérsékletük feletti hőmérsékleti tartományban elveszítik azt). Egyetlen mágneses domént tartalmaznak, így minden nanorészecskéhez egyértelműen meghatározott mágnesezettség vektor rendelhető. Az egyes nanorészecskék – mágnesezettségük révén – a külső mágneses térrel kölcsönhatásba lépnek. Például időben állandó mágneses tér hatására az egyedi részecskék mágnesezettség vektora beáll a tér irányába, relaxálódik (1. ábra).

Időben változó külső gerjesztő tér esetén pedig a relaxáció során követi a teret. A relaxáció, illetve általánosabban a mágnesezettség dinamikájának vizsgálata nanorészecskék esetén elméleti és gyakorlati szempontból is érdekes. Példaként említhetjük a mágneses információátvitelt vagy az MRI-t. A mágneses nanorészecskék a külső gerjesztő tér hatására a relaxáció során energiát vesznek fel a gerjesztő térből, vagyis hőt termelnek. A legtöbb alkalmazás esetében ez energia-vesztésként jelentkezik, ezért fontos ennek csökkentése. Ez alól kivételt képez a külső gerjesztő tér alacsony frekvenciás tartományába eső orvosi alkalmazások esete, ahol az energiavesztés, azaz a hőtermelés maximalizálása a feladat. A relaxáció során a környezetnek leadott hő jól alkalmazható tumorterápiás célokra, mivel bizonyos tumorsejtek érzékenyebben reagálnak a hőmérsékletemelkedésre, mint az egészséges szövetek.

Számos tudományos munka foglalkozik a nanorészecskék anyagának, illetve (az orvosi alkalmazáshoz elengedhetetlen) biokompatibilis burkolatának optimális megválasztásával [1, 2]. A legtöbb tanulmány rezgő külső mágneses gerjesztő térre vonatkozik, míg viszonylag kevés vizsgálat történt forgó esetre, ráadásul ezek elsősorban a dinamikai folyamatokra és nem a veszteség meghatározására vonatkoznak. Tehát az energiavesztés meghatározása és ezen keresztül a hőtermelés hatékonyságának lehetséges növelése forgó mágneses tér esetén nyitott kérdés. Kutatási munkánkban hosszú távú célkitűzésünk a forgó külső

gerjesztő tér esetén kapott relaxáció elméleti tanulmányozása. Arra a kérdésre keressük a választ, hogy lehetséges-e és ha igen, akkor milyen feltételek mellett tudunk nagyobb hőtermelést elérni, ha a külső gerjesztő teret két, egymásra merőleges rezgő tér összegéként állítjuk elő úgy, hogy egymáshoz képest 90° fáziskülönbséggel rezegjenek, vagyis eredőjük egy forgó tér legyen. (Ezt hasonlítjuk össze az azonos fázisban vett eredő tér esetével, ami a rezgő esetnek felel meg.)

Lázterápia – hyperthermia

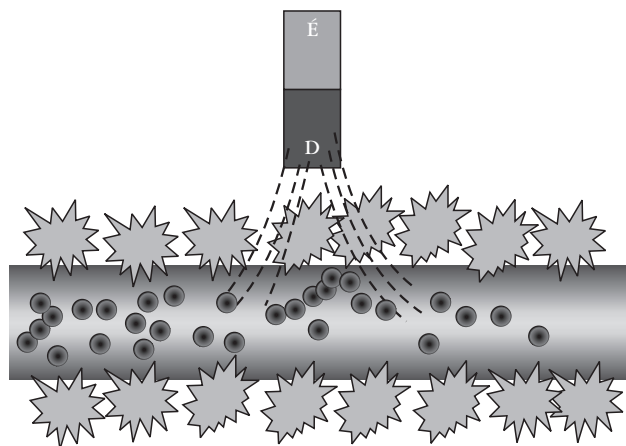
A mágneses nanorészecskékkel végzett hyperthermiának számos előnye létezik a hagyományos tumorterápiás eljárásokkal szemben. Ezek közül – a teljesség igénye nélkül – csak a legfontosabbakat említhetjük meg. Ez az alternatív daganatkezelési módszer rendkívül lokalizált, vagyis a mágneses nanorészecskék hőtermelő hatásukat csak a rákos sejtek közvetlen közelében fejtik ki, így nem károsítják az egészséges emberi szöveteket, illetve hatóanyagok szállítására is alkalmasak (2. ábra).

A hyperthermia nem vált ki a szervezet számára megterhelő mellékhatásokat (szédülés, fejfájás, hányinger, allergiás reakciók), mint a kemoterápiás kezelések.

Többek között olyan daganatok kezelésére is kiválóan alkalmas, amelyek sebészeti úton nagyon nehezen kezelhetőek, mint például az agydaganat, amely kezelése során a vér-agy gát miatt még a gyógyszeres kezelési eljárás is nehézségekbe ütközik.

A hyperthermia számos előnye mellett azonban – nagyon fontos hangsúlyozni – nem önálló kezelés, hanem a hagyományos kemo- és sugárterápiás eljárások mellett alkalmazható kiegészítő terápia. Ezen daganatkezelési módszerek kombinációja ugyanis akkor is hatásos lehet, ha a kezelések külön-külön nem bizonyulnak hatékonyak, vagy a beteg szervezete nem megfelelően reagál.

2. ábra. A mágneses nanorészecskék terelhetők külső mágneses tér segítségével, így hatóanyagok szállítására használhatók, illetve a külső gerjesztő tér hatására hőt termelnek, amely jól alkalmazható tumorterápiás célokra [2].



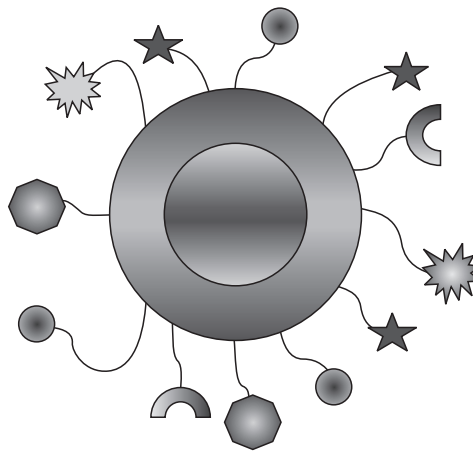
A mágneses nanorészecske jellemzői

Optimális esetben a nanorészecskék a 10–200 nanométeres mérettartományba esnek. Ennél kisebb méret esetén – a véráramba jutva – a vesén keresztül túlzottan hamar kiürülnek az emberi szervezetből. Az ennél nagyobb méret a lokalizálás szempontjából jelenthet problémát, illetve a kristályon belül mágneses doménfalak kialakulásához vezethet, ami a hőtermelő-képességet csökkenti. A vizsgálatok azt bizonyítják, hogy az energiatermelés hatékonysága szempontjából az egydoménes részecskék sokkal kedvezőbbek, mint azok a részecskék, amelyekben doménfalak vannak.

Fontos, hogy a mágneses nanorészecskék Curie-hőmérsékleténél alacsonyabb hőmérséklet-tartományon dolgozzunk, hiszen a Curie-hőmérséklet felett a részecskék elvesztik mágneses tulajdonságukat, és a külső gerjesztő térre nem reagálnak. Ebből következik, hogy kizárólag olyan anyagokat választhatunk, amelyek Curie-hőmérséklete magasabb, mint 42 °C. A Curie-hőmérsékletet célszerű úgy hangolni, hogy az a 42–45 °C tartományba essen, mert 45 °C felett az anyag elveszti mágneses tulajdonságát, megszűnik a hőtermelés és így könnyedén megakadályozhatjuk az emberi szervezet túlfűtését. A hő hatására bekövetkező sejtpusztulásnak két típusa létezik: az apoptózis és a nekrozis. Az apoptózis, azaz a természetes sejthalál jellemző 45 °C alatti hőmérsékleten, ekkor az elpusztult sejteket a makrofágok eltávolítják az emberi szervezetből. A nekrozis során, vagyis a 45 °C feletti hőmérsékleten a szervezet nem tudja megfelelő módon „eltakarítani” az elpusztult sejteket, így súlyos gyulladás, vérmérgezés alakulhat ki.

Minden egyes mágneses nanorészecskét biokompatibilis külső burkolat borít, amely véd a nanorészecskék esetleges toxikus hatásától, ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a terápiát lokálissá tegyük, azaz a mágneses nanorészecskék hőtermelő hatásukat kizárólag a rákos sejtek közvetlen közelében fejtsék ki. A hőtermelés kétféleképp lehetséges: vagy a mágneses nanorészecske rögzített és csak a mágnesezettség orientációja változik, vagy maga a mágneses nanorészecske is elfordulhat. A részecske mindkét esetben a külső gerjesztő térből vesz fel energiát és azt valamilyen sűrűlódás hatására leadja környezetének. Az első esetben mágneses viszkozitásról, míg a második esetben a szokásos értelemben vett viszkozitásról beszélünk. Ennek megfelelően a két eset tárgyalása ugyanazon matematikai formalizmus segítségével lehetséges, legfeljebb viszkozitási együtthatóban térnek el egymástól. Ha a mágneses nanorészecskék mérete kisebb, mint 20 nm, akkor a részecskék nem tudnak elmozdulni a közegben, vagyis csak a mágnesezettség orientációja változik. Ezen méretskála felett a részecskék elfordulása lehetséges és a szokásos értelemben vett viszkozus fűtésről beszélünk [3].

A mágneses nanorészecskék lokalizálása, a rákos sejtekhez való eljuttatása háromféleképpen valósítható meg: mágneses tereléssel (bőr közelében), markerek segítségével (biokémiai úton), vagy közvetlenül a tumorba való injekciójásuk révén.



3. ábra. A külső burkolat számos funkció csoportot is tartalmaz, amelyek lehetővé teszik a nanorészecske tumorsejthez való specifikus kapcsolódását, a sejtekbe való esetleges behatolását, továbbá tumorelleses gyógyszermolekula is kapcsolható még hozzá. A nanorészecskéről leelőg alakzatok az ilyen különböző típusú csoportokat jelölik [1].

Ehhez az szükséges, hogy a külső biokompatibilis burkolathoz „receptorok”, „markerek”, „ligandumok” kapcsolódjanak, amelyek alkalmasak gyógyszermolekulák megkötésére, továbbá segítségükkel a nanorészecskék a tumorsejtekhez irányíthatóak. Egy mágneses nanorészecske sematikus ábráját szemlélteti a 3. ábra.

A kutatás célja

Elméleti kutatómunkánk fő célja annak feltérképezése, milyen feltételek mellett lehet – a külső gerjesztő tér paramétereinek változtatásával – a hőtermelés hatékonyságát növelni. Például biztosíthat-e nagyobb hőtermelést, ha forgó (cirkulárisan polarizált) teret használunk a szokásos rezgő (lineárisan polarizált) térrel szemben. Egy ilyen kérdés megválaszolása szisztematikus vizsgálatot igényel. Célszerű a legegyszerűbb esettel kezdeni, azután haladni a bonyolultabb számítási technikát igénylő realizisztikusabb modellek felé.

Első lépésként egyetlen, gömbszimmetrikus (izotróp) mágneses nanorészecske esetét vizsgáltuk, ami nyilvánvalóan durva egyszerűsítést jelent. A részecske elkerülhetetlenül anizotróp, mert nem pontosan gömb alakú (alak-anizotrópia) és egykristály lévén, nem lehet amorf (kristály-anizotrópia). A környezettel való kölcsönhatás eredményeként fellépő relaxációt a „legegyszerűbb” módon (a később részletezett determinisztikus Landau–Lifshitz–Gilbert-egyenletet használva) vettük figyelembe [4]. Az izotrópia azt jelentette, hogy mágneses szempontból nincs kitüntetett irány a mágnesezettségvektor számára. Az egyrészecskére kapott eredmény segítségével számoltunk ki egy sok-részecskés rendszer esetén várható átlagot. Azt kaptuk, hogy izotróp esetben a rezgő, külső gerjesztő térrel nagyobb energiavesztést lehet elérni, mint forgó térrel [4]. Hasonló eredményt publikáltak [5] arra az esetre is, amikor nem a determinisztikus, hanem a környezettel való termikus kölcsönhatást

pontosabban figyelembe vevő sztochasztikus Landau–Lifshitz–Gilbert-egyenletet használták (de továbbra is izotróp részecskét vizsgáltak).

Ennek megfelelően a következő lépés a valóságban nyilvánvalóan jelenlévő anizotrópia figyelembe vétele volt. Két anizotrópiatípus létezik, a kristálytérés az alakanizotrópia. Számításaink során a dominánsabb alakanizotrópiát vettük figyelembe, vagyis amikor a mágnesezettségvektor számára létezik egy egyértelműen kitüntetett irány. A legegyszerűbb modell az egy-tengelyű anizotrópia, ahol a nanorészecskéket egyetlen forgástengelyű elnyújtott szivarnak vagy lapos lencsének képzeljük. Arra a kérdésre kerestük a választ, hogy vajon a mágneses nanorészecskék anizotrópiájának figyelembe vételével növelhető-e a hőtermelés hatékonysága forgó tér esetén [6].

Landau–Lifshitz–Gilbert-egyenlet

A mágneses nanorészecskék relaxációjának leírására az egyik legegyszerűbb módszer a Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) egyenlet használata (lehet determinisztikus vagy sztochasztikus). Ezen egyenlet megoldásával megkapjuk a mágnesezettségvektor időbeli változását külső gerjesztő tér, illetve az anizotrópiát figyelembe vevő úgynevezett anizotrópiatér jelenlétében (vagyis ez a mozgásegyenlet). A determinisztikus LLG egyenlet tartalmaz egy sűrűdésjellegű tagot, aminek segítségével írjuk le a relaxációt. Sztochasztikus esetben a termikus fluktuációk is fontos szerepet játszanak, ami a környezettel való termikus kölcsönhatás pontosabb leírását jelenti, viszont a megoldás megtalálása nehezebb feladat. A sztochasztikus LLG egyenlettel nem végeztünk vizsgálatokat.

Ha ismerjük az LLG egyenlet megoldását, akkor ki tudjuk számítani a veszteséget, vagyis például az egy ciklusra eső hőtermelést. A determinisztikus LLG egyenlet legfontosabb tulajdonsága, hogy a mágnesezettségvektor nagyságát nem változtatja meg, ezért bevezetjük az $\mathbf{M} = \mathbf{m}/m_s$ egységvektort (ahol \mathbf{m} a mágnesezettségvektor és m_s annak nagysága). Az LLG egyenlet tehát a mágnesezettség dinamikáját leíró differenciálegyenlet, amely a következőképpen írható,

$$\frac{d}{dt}\mathbf{M} = -\gamma'(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) + \alpha'[(\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \times \mathbf{M}],$$

ahol \mathbf{H}_{eff} a külső, forgó mágneses tér és az anizotrópiatér együttese. \times a vektoriális szorzatot jelöli. γ' arányos a giromágneses együtthatóval, az α' sűrűdési tényező a sűrűdés leírására bevezetett fenomenológikus állandó. Az egyenletben szereplő második tag felelős a relaxáció figyelembevételért.

Az x - y síkban forgó \mathbf{H}_{ext} külső mágneses tér:

$$\mathbf{H}_{ext} = \frac{\omega_L}{\gamma'}(\cos(\omega t), \sin(\omega t), 0),$$

ahol ω a forgás szögsebessége, ω_L a Larmor-frekvencia. A \mathbf{H}_{aniso} anizotrópiatér a szakirodalomban sze-

replő adatokkal való összehasonlítás céljából úgy választottuk, hogy a forgó síkra merőleges, vagyis z -irányú legyen:

$$\mathbf{H}_{aniso} = \frac{\omega_L}{\gamma'}(0, 0, \lambda_{eff}M_z),$$

ahol M_z a mágnesezettség z -komponense, λ_{eff} pedig az anizotrópia mértékét jellemző dimenziótlan paraméter, amely megmutatja, hogy az anizotrópiatér mennyire releváns a külső gerjesztő térhez képest. Ha $\lambda_{eff} \rightarrow \infty$, akkor az anizotrópiatér dominál és a külső gerjesztő tér elhanyagolható az anizotrópiatérhez képest.

Ha az anizotrópiatér – mint esetünkben is – a külső, forgó tér forgástengelyével esik egybe, akkor

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{ext} + \mathbf{H}_{aniso} = \frac{\omega_L}{\gamma'}(\cos(\omega t), \sin(\omega t), \lambda_{eff}M_z).$$

Célszerű áttérni a külső forgó térhez rögzített koordináta-rendszerbe, ahol az \mathbf{O} koordináta-transzformáció mátrixa:

$$\mathbf{O} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Az új, Descartes-koordinátákbeli \mathbf{u} egységvektor komponensei (u_x , u_y és u_z) az alábbi transzformáció segítségével kaphatók meg a laboratóriumi rendszerben definiált mágnesezettségvektorból:

$$\mathbf{u} \equiv (u_x, u_y, u_z) = \mathbf{O}\mathbf{M}.$$

Áttérve a θ , ϕ polárkoordinátákra (és felhasználva, hogy \mathbf{u} és \mathbf{M} egységvektorok, azaz $|\mathbf{u}| = |\mathbf{M}| = 1$):

$$u_x = \sin\theta \cos\phi,$$

$$u_y = -\sin\theta \sin\phi,$$

$$u_z = \cos\theta.$$

Ekkor az LLG egyenlet alakja a következő:

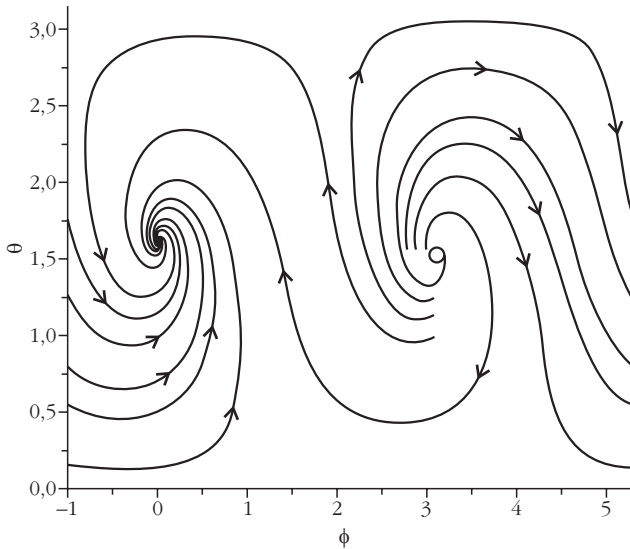
$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_L \sin\phi + \alpha_N \cos\theta \cos\phi - \alpha_N \lambda_{eff} \sin\theta \cos\theta,$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_L \cos\phi \frac{\cos\theta}{\sin\theta} + \omega - \alpha_N \frac{\sin\phi}{\sin\theta} - \omega_L \lambda_{eff} \cos\theta,$$

ahol $\omega_L = \gamma' |\mathbf{H}_{ext}|$, $\alpha_N = \alpha' |\mathbf{H}_{ext}|$.

A $\lambda_{eff} = 0$ izotróp eset

Az izotróp esetre felírt LLG egyenlet megoldása során azt kapjuk [4], hogy a mágnesezettségvektor – kezdőfeltételtől függetlenül – mindig stacionárius megoldásra áll be:



4. ábra. Az izotróp esetre ($\lambda_{eff} = 0$) vonatkozó LLG egyenlet numerikus megoldása az $\alpha_N = 0,1$, $\omega = 0,01$ és $\omega_L = 0,2$ paraméterekkel.

$$M_x(t) = u_{x0} \cos(\omega t) - u_{y0} \sin(\omega t),$$

$$M_y(t) = u_{x0} \sin(\omega t) + u_{y0} \cos(\omega t),$$

$$M_z(t) = u_{z0},$$

ami a forgó térhez rögzített rendszerben egy fixponti megoldást jelent. Fixpont alatt azt értjük, hogy a forgó koordináta-rendszerben érvényes differenciálegyenletek bal oldalán álló $d\theta/dt$ és $d\phi/dt$ deriváltak nullának adódnak, a laboratóriumi rendszerben – amelyben a mágneses részecske energiát ad le – a mozgás forgó marad.

A 4. ábrán két fixpont jelenik meg. Az egyenlítő felett egy vonzó fixpont (pont), míg az egyenlítő alatt egy taszító fixpont (üres kör). A polárkoordinátákat úgy választottuk, hogy az egyenlítő az ábrát két egyenlő részre osztó vízszintes vonal.

Izotróp esetben az egy ciklusra eső energiavesztés (hőtermelés nagysága) a stacionárius megoldás alapján a következő képlettel számolható ki:

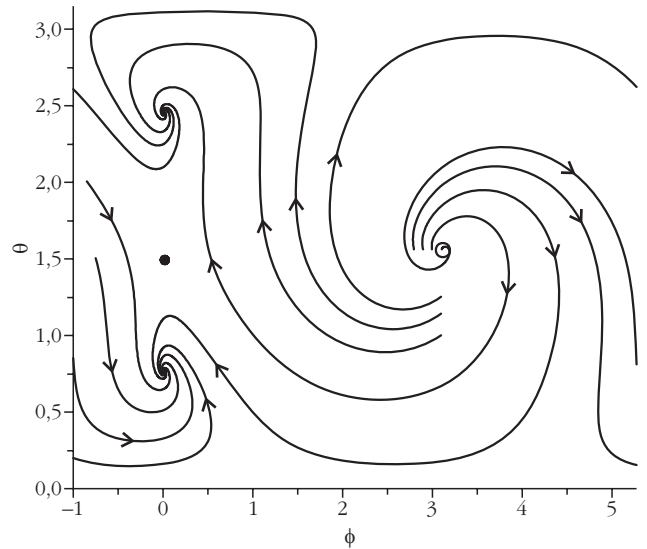
$$E = \mu_0 m_s \int_0^{2\pi} dt \left(\mathbf{H} \cdot \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right) = \mu_0 2\pi m_s H(-u_{y0}),$$

amely képlet anizotróp esetben is használható lesz.

A relaxáció elméleti tanulmányozása során az adott, hogy izotróp nanorészecskék alacsony frekvenciás határesetében – vagyis a hyperthermia tartományában – rezgő, külső, gerjesztő tér alkalmazásával nagyobb energiavesztés érhető el, mint forgó, külső, gerjesztő tér felhasználásával.

Anizotróp eset, alacsony (10^5 Hz) frekvencia

Anizotróp ($\lambda_{eff} \neq 0$) esetben az LLG egyenlet megoldása során – a forgó térhez rögzített rendszerben – szintén fixponti megoldásokat kapunk [6]. A vonzó fixpontok száma azonban függ az anizotrópia nagyságától.

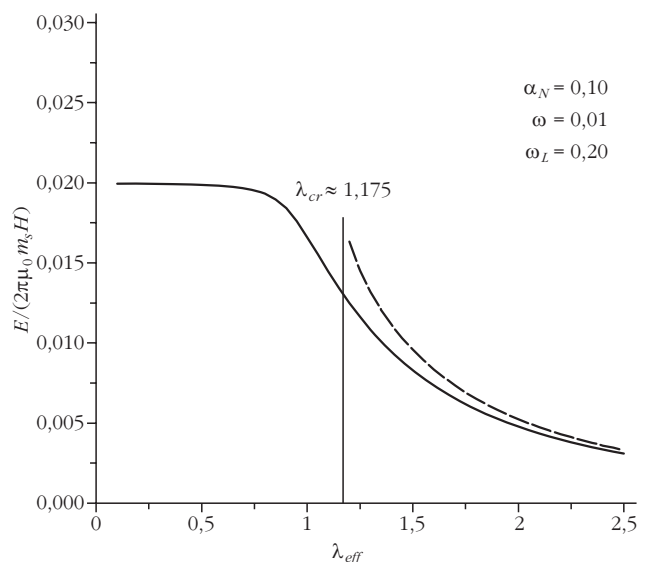


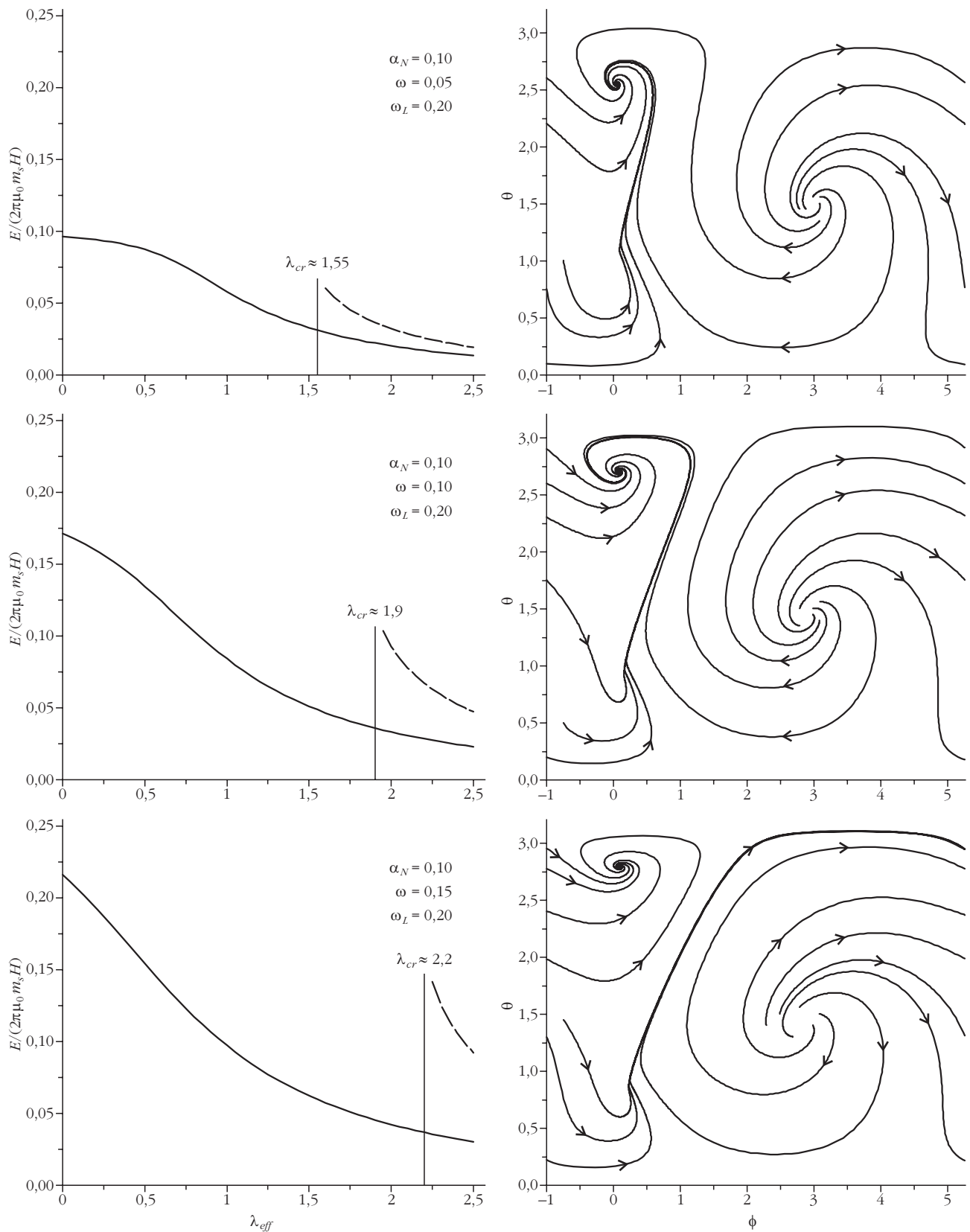
5. ábra. Az anizotróp ($\lambda_{eff} \neq 0$) esetre vonatkozó LLG egyenlet numerikus megoldása az $\alpha_N = 0,1$, $\omega = 0,01$, $\omega_L = 0,2$ és $\lambda_{eff} = 1,5$ paraméterekkel.

Anizotróp esetben minden egyes α_N , ω és ω_L paraméterhármashoz tartozik egy λ_{cr} kritikus anizotrópia-érték, amelynél nagyobb λ_{eff} értékek esetén már nem egy, hanem két vonzó fixpont jelenik meg. Az egyik vonzó fixpont az egyenlítő alatt, míg a másik az egyenlítő felett helyezkedik el, a két vonzó fixpontot pedig a nyeregpontra (különálló fekete pont) választja el egymástól, mint ahogyan ezt az 5. ábra is szemlélteti.

A vonzó fixpontok számának növekedése egyben azt is jelenti, hogy az energiavesztést nem elegendő csupán egy pontra számolni, hanem a második vonzó fixpontra is alkalmazni kell az energiavesztés meghatározására szolgáló képletet. Az így kapott eredményeket a 6. ábra szemlélteti, ahol a vízszintes tengelyen az anizotrópia nagysága, a függőleges tengelyen pedig az egy ciklusra eső energiavesztés

6. ábra. Az energiavesztés ábrázolása az anizotrópia függvényében. A folytonos vonal az egyenlítő feletti, a szaggatott vonal az egyenlítő alatti vonzó fixponthoz tartozó energiavesztést szemlélteti.





7. ábra. Anizotróp egy-részecskére vonatkozó számítási eredményeink összegzése a moderált frekvenciatartományon.

van feltüntetve. A folytonos és a szaggatott vonal a két különböző vonzó fixponthoz tartozó energiavesztéséget szemlélteti, amely a $\lambda_{eff} \rightarrow 0$ határesetben az izotróp egy-részecskére vonatkozó számítási eredmé-

nyeket adja vissza. Jól látható, hogy a függvény monoton csökkenő, vagyis az anizotróp egy-részecskét leíró esetben [6] nem tudunk nagyobb energiavesztéséget elérni, mint korábban az izotróp esetben [4].

A 6. ábráról az is leolvasható, ha $\lambda_{eff} < \lambda_{cr}$, azaz csak egyetlen vonzó fixpont van, akkor az energiavesztés nem sokkal tér el az izotróp esettől, míg a második vonzó fixpont, vagyis $\lambda_{eff} > \lambda_{cr}$ megjelenése nagy mértékben csökkenti az energiavesztést, ami jelen esetben kedvezőtlen jelenség.

Anizotróp eset, közepes frekvencia

Az energiavesztés kiszámítását – a teljesség kedvéért – a magasabb frekvenciák irányába haladva is elvégeztük [7], itt azonban törekednünk kellett arra, hogy még a hyperthermia tartományán belül maradjunk, hiszen ellenkező esetben az eljárás alkalmatlanná válik tumortherápiás célokra.

Az így kapott eredményeket – az egyre növekvő frekvenciák irányába haladva – a 7. ábra foglalja össze. A bal oldali oszlopban az energiavesztést ábrázoltuk az anizotrópia függvényében, a jobb oldali oszlopban pedig az anizotrópia kritikus értékéhez tartozó fázisgörbét tüntettük fel. Látható, hogy nagyobb frekvenciák esetén az anizotrópia kritikus értéke is megnő, de az energiavesztés továbbra is az izotróp esethez tartozó érték alatt marad.

Összegzés

Eddigi kutatómunkánk alapján úgy tűnik, hogy nem érdemes forgó teret használni. Izotróp esetben a rezgő külső tér esetén adódott nagyobb hőtermelés. Továbbá azt tapasztaltuk, hogy forgó gerjesztő tér esetében az anizotrópia ($\lambda_{eff} > 0$) csökkenti az energiavesztést (hőtermelést), függetlenül attól, hogy a frek-

vencia közepes vagy alacsony tartományán vizsgálódunk. Természetesen ezen eredmények további finomítást igényelnek, hiszen közelítéseket használtunk. A környezettel való termikus kölcsönhatás pontosabb leírását kapnánk például, ha a sztochasztikus LLG egyenletet próbálnánk megoldani.

Mielőtt a realiztikusabb (egyben technikailag nehezebben kezelhető) egyenletek felé fordulnánk, érdemes két részletre kitérni és itt a zárszóban megemlíteni. Az egyik a negatív anizotrópia-paraméter, $\lambda_{eff} < 0$ használata (lapos lencse az elnyújtott szivar helyett). Ekkor – eddigi eredményeink alapján – forgó tér esetén, kis anizotrópia-értékeknél az egy ciklus alatt termelt hő növekedésére számíthatunk az izotróp esethez képest. Másrészt, az előzetes számítások alapján úgy látjuk, hogy váltakozó irányú forgó teret alkalmazva növelhető az egy ciklusra eső hőtermelés. E kettő – a negatív anizotrópia-paraméter és a váltakozó irányú forgó tér – kombinálása ígéretesnek tűnik, ami talán elvezet ahhoz, hogy hatékonyabbá tegyük a hőtermelést a forgó külső gerjesztő tér használatával.

Irodalom

1. S. Bucak, B. Yavuztürk, A. D. Sezer: Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Surface Modifications and Application in Drug Delivery. in *Recent Advances in Novel Drug Carrier Systems*. ISBN: 978-953-51-0810-8, (2012), <http://dx.doi.org/10.5772/52115>
2. A. L. E. Rast: *Thesis* (Ph.D.) University of Alabama, Birmingham, 2011.
3. G. Vallejo-Fernandez et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 312001; *Europhysics News* 44/6 (2013) 18.
4. P. F. de Châtel, I. Nándori, J. Hakl, S. Mészáros, K. Vad, *J. Phys.: Condens. Matter* 21 (2009) 124202.
5. Yu. L. Raikher, V. I. Stepanov, *Physical Review E* 83 (2012) 021401.
6. I. Nándori, J. Rácz, *Physical Review E* 86 (2012) 061504.
7. J. Rácz, I. Nándori, J. Halász, P. F. de Châtel, *Acta Phy. Deb. XLVII* (2013) 163.

A JELÖLÉSMENTES BIOÉRZÉKELÉS MODERN ESZKÖZEI

Janosov Milán

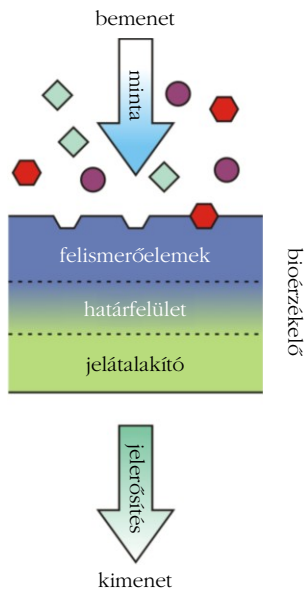
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizikai Tanszék

Kozma Péter

Fraunhofer Institute for Biomedical Engineering, Potsdam, Németország

Egyre gyakoribb, hogy a fizikai tudományok más természettudományokkal együttműködve keresnek választ napjaink tudományos és technikai kihívásaira, megválaszolható kérdéseire. Így az interdiszciplinaritás már nem csupán a kutatásokban és fejlesztésekben, valamint az ezeket tárgyaló nemzetközi szakirodalomban jelenik meg, hanem egyre több példát találhatunk erre az egyetemi képzés- és kurzuskínálatban is. A tudományterületek ilyen jellegű összefonódásának klasszikus képviselői a következőkben bemutatott *bioérzékelők*, amelyek tervezéséhez és megépítéséhez nem csupán biológiai, fizikai és kémiai ismeretek szükségesek, hanem az orvosi szemlélet és a mérnöki látásmód is nélkülözhetetlen.

1962-ben Clark és Lyons megalkotta az első bioérzékelőt, az enzim elektródot, amelyben elsőként ötvöztek egy biológiai folyamatot, az enzimműködést egy hagyományos elektrokémiai mérés technikával, az amperometriával, hogy ily módon a koszorúérműtétek során lehetővé tegyék a vér oxigéntartalmának folyamatos mérését [1]. Úttörő munkájukkal új tudományterületet indítottak útjára, amelyet ma bioszenzorikaként ismerünk. Az elmúlt fél évszázad során a bioszenzorika számos orvosbiológiai és biotechnológiai alkalmazása látott napvilágot, amelyekkel nem csupán izgalmas alapkutatási kérdésekre adható válasz, de segítségükkel ma már a mindennapi élet is megkönnyíthető. Gondoljunk például a vércukorszintmérőkre vagy az



1. ábra. A bioérzékelők működésének általános vázlatja: a biológiai mintában detektálni kívánt célmolekulákat a felismerőelemek specifikusan megkötik, majd a kölcsönhatás okozta fizikai változásokat a jelátalakító egység feldolgozható jellé alakítja [3].

egyszerű, otthon elvégezhető terhességi tesztekre. Továbbá a drog- és doppingvizsgálatokat is gyakran ilyen eszközökkel végzik, valamint az ipar is széles körben alkalmaz bioszenzorokat, például víz- és élelmiszerminőség ellenőrzésre.

A bioérzékelők első, általánosan elfogadottá vált definícióját megjelenésükhöz képest több mint harminc évvel később, 1987-ben *Turner* adta, aki következőképpen fogalmazott [2]: „A bioérzékelő kompakt analitikai eszköz vagy egység, amelyben biológiai vagy biológiai úton előállított érzékeny felismerőelemeket integrálnak fizikai-kémiai jelátalakítóba.”

E definíció pontos jelentését és a bioérzékelők általános működését az 1. ábra segítségével könnyen megérthetjük. Eszerint a célmolekulákat is tartalmazó biológiai minta (oldat vagy gáz) a felismerőelemekkel borított bioszenzor érzékelőfelületét éri. A felismerőelemek feladata a keresett célmolekulák kizárólagos és hatékony megkötése. A bekötődés fizikai, illetve kémiai változásokat okoz az érzékelőfelületen, amelyeket a jelátalakító egység erősít fel, s alakítja át – például elektromosan – feldolgozható jellé [3]. A bioérzékelők feladata tehát valamilyen célmolekula specifikus kimutatása a vizsgált környezetben (mintában). E célmolekulák lehetnek akár orvosi diagnózist segítő jelzőmolekulák, drogok vagy környezetet veszélyeztető anyagok (például: robbanóanyag-molekulák, mérgezőanyagok).

Az érzékelők fejlesztésének egyik fontos iránya a mérési érzékenység javítása. Ma már lehetséges akár néhány száz daltonos¹ molekulák pikomólos nagyságrendű koncentráció mellett detektálása is. Ahhoz

¹ Da, Dalton: az atomi tömegegység, a molekuláris jelenségek tanulmányozásakor alkalmazott tömegegység. Megállapodás szerint a ¹²C atom tömegének egytizedrészére.

azonban, hogy ilyen csekély mennyiségű célmolekulát érzékeljünk valódi mintákban, amelyekben a célmolekulák mellett akár lényegesen nagyobb mennyiségben számos más molekula is jelen lehet, nem csupán érzékeny, hanem egyúttal specifikus eljárások alkalmazására van szükségünk.

A célmolekulák specifikus felismerésére kétféle stratégiát ismerünk: jelöléses és jelölésmentes technikákat. Jelöléses vizsgálatok során a célmolekulákat, vagy a hozzájuk specifikusan kötődni képes egyéb molekulákat például fluoreszcens, radioaktív vagy mágneses anyaggal megjelölik. Ezt követően a célmolekulákat közvetlenül, e hozzájuk csatolt jelölők segítségével detektálják. A jelöléses módszerek fontos előnye a velük elérhető érzékenység, ugyanis így módon akár egyedi molekulák nyomon követése is lehetővé válik [4]. Komoly hátrányuk azonban, hogy a jelölőmolekulák célmolekulákhoz történő csatolása módosíthatja a mérés eredményét. Továbbá a jelölő eljárások idő-, laboratórium- és költségigényesek. Ennek következménye, hogy a bioszenzorikai kutatások mindinkább a jelölésmentes eljárások felé fordulnak, amelyek – ahogy azt a nevük is mutatja – jelölők nélkül valósítják meg a molekulaérzékelést. A célmolekulák ilyen módon történő közvetlen detektálására gyakran használnak tömegérzékes, hőmérsékletmérő vagy elektrokémiai módszereket. A mai jelátalakítók többsége azonban optikai elven működik. A következő fejezetekben bemutatjuk a legelterjedtebb biológiai felismerőelemeket, továbbá a leggyakrabban alkalmazott jelátalakító rendszereket.

Felismerőelemek

– főbb eljárások ismertetése példákkal

A célmolekula-felismerés alapja minden esetben a köztük és a felismerőelemek között fellépő specifikus, molekuláris kölcsönhatás, amely általában másodlagos kémiai kötésekre vezethető vissza. A másodlagos kötések között három fő típust különböztetünk meg: az ellentétes töltésű ionok vagy molekularészek között fellépő elektrosztatikus vonzást, a hidrogénatomok és egy-egy nagy elektronegativitású atom (általában nitrogén, oxigén vagy fluor) nem kötő elektronpárjai között kialakuló hidrogénhidrat, valamint a semleges molekulák (mint forgó elektromos dipólusok) között fellépő van der Waals-kölcsönhatásokat [5]. Ezen másodlagos kölcsönhatásokon keresztül kapcsolatban álló atompárok nagy száma és a makromolekula térszerkezetének egyedi geometriája specifikus kölcsönhatási mintázatokat eredményez, így alkalmas kötőhelyeket alakít ki a biológiai makromolekulák felületén. E pártenciálból felépülő térbeli mintázatokra igaz, hogy létezik komplementermintázatuk, amely kiemelkedően nagy affinitással képes hozzájuk kötődni. Az ilyen komplementer molekulapárok kiválóan alkalmasak arra, hogy felhasználásukkal specifikus bioérzékelőket készítsünk.

A modern bioérzékelők megalkotásának első lépése az élővilágban előforduló természetes érzékelőmolekulák felismerőelemekként történő alkalmazása volt. Ezt követően a természetben előforduló biológiai rendszerek fokozatosan egyre mélyebb megértése hozzásegítette a kutatókat ahhoz, hogy ezeket biológiailag módosítva építsék be szenzoraikba. Ily módon gyakorlatilag bármilyen célmolekula nagy specificitással történő detektálása megvalósíthatóvá vált. A mai tudomány pedig már a természettől elcsúszott ötleteket felhasználva, sőt akár azokon továbblépve a mesterségesen létrehozott, szintetikus felismerőelemek korát éli. Ezt a gondolatmenetet folytatva a következő alfejezetek néhány fontos példával mutatják be a természetes, módosított, valamint mesterséges felismerőelemeket.

Természetes felismerőelemek

Az élő szervezetek működéséhez elengedhetetlen, hogy képesek legyenek különféle molekulák specifikus érzékelésére. Ilyen mechanizmusok figyelhetők meg már a koncentráció-gradiens érzékelése útján tápanyagot kereső baktériumok esetén és az egyszerűbb többsejtű szerveződések alkotó sejtek közötti kémiai kommunikáció során is, de éppúgy kulcsfontosságúak a fejlettebb élőlények életében például a szaglás, az ízlelés és az immunrendszer működésében. Ezek a természet által kifejlesztett molekulaérzékelési eljárások – ahogy azt már a fentiekben ismertettük – felhasználhatók bioszenzorikai alkalmazásokra is.

Elsőként említendő a receptormolekulák (latin *receptor* – felfogó szerv), amelyek természetben betöltött szerepe is a célmolekulák specifikus azonosítása. A sejteket határoló membránban, molekulamegkötő alegységükkel az extracelluláris térbe nyúlva helyezkednek el, így a kívülről érkező célmolekulák hatását a sejt belső környezete felé közvetítik (2.a ábra). Az élő sejtekben kifejlődő receptorok a sejtek frakcionalizálásával izolálhatók, majd a szenzorfelü-

letre kémiai úton rögzíthetők, azaz felismerőelemként alkalmazhatók.

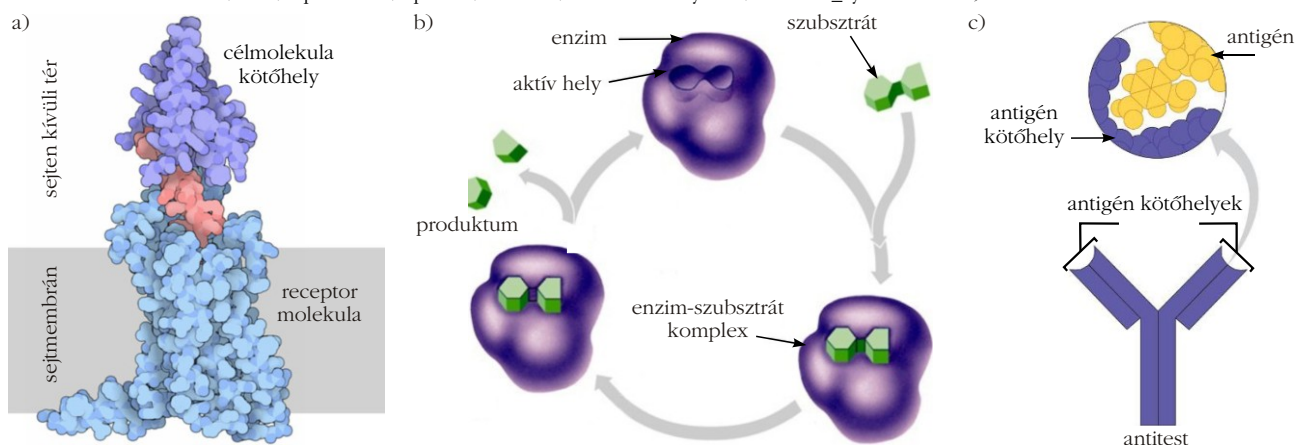
Az enzimek, azaz katalizáló hatású fehérjemolekulák szintén gyakran használt felismerőelemek, amelyek működésük során nagy specificitással kötik meg a terméké (produktum) átalakítandó alapanyagokat (szubsztrátokat). A bekötődés alapja jellemzően a molekulák közti komplementaritás, amely a kölcsönhatási mintázaton keresztül a térszerkezetben jelenik meg (2.b ábra). A mintában előforduló alapanyagok, esetünkben a célmolekulák koncentrációjára pedig az enzimatis kölcsönhatás során keletkező termékek mennyiségének méréséből következtethetünk.

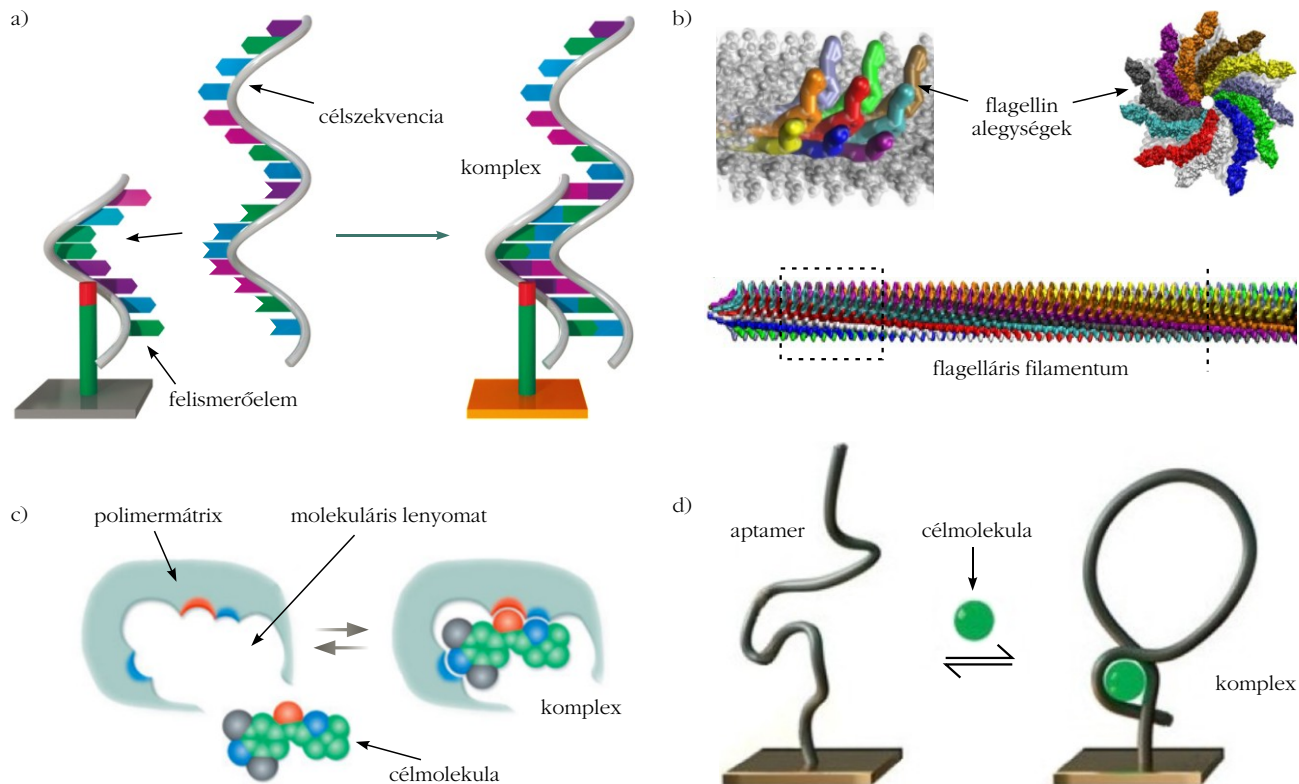
Napjaink legelterjedtebb felismerőelem-típusát azonban az élő szervezetek immunrendszerétől kölcsönöztük. Ismert ugyanis, hogy ha az élő szervezetbe idegen elemek, úgynevezett antigének jutnak be, akkor a szervezet válaszul specifikus antitesteket kezd el termelni, amelyek csakis ezeket ismerik fel, azaz hozzájuk kötődnek, hogy később egyéb szervezetbeli mechanizmusok számára jelzőként szolgálva az antigének lebonthatók legyenek (2.c ábra). Amennyiben tehát egy bizonyos célmolekulára érzékeny antitestcsaládra van szükség, valamilyen gazdaszervezetbe (amely lehet például nyúl, kecske vagy bárány) bejuttatják a célmolekulákat, amelyeket a szervezet antigéneknek tekint, így rájuk specifikus antitesteket kezd termelni. Ezek az antitestek később az állat véréből izolálhatók és szenzorikai célokra felhasználhatók.

Módosított felismerőelemek

A módosított felismerőelemek a természetes eredetű, általában élő szervezetekből kinyert és biokémiai eljárásokkal módosított biológiai molekulák csoportja. Ide sorolhatjuk az élő sejtekből kivont, majd továbbalakított nukleinsavakat és fehérjéket, vagy akár sejtorganellumokat is. A következőkben ezekre látnunk két példát.

2. ábra. a) A sejtmembránban található receptormolekulák specifikus kötőhelyeik segítségével felismerik a sejtet kívüli térből érkező célmolekulákat (http://sbkb.org/featuredmolecule/gcgr_model.jpg). b) Az enzimek működésük során a szubsztrátmolekulákat az aktív helyükön produktumokká alakítják (http://www.tokresource.org/tok_classes/biobiobi/biomenu/enzymes/EScomplex.jpg). c) Az antitestek a szervezetbe jutó idegen molekulákat antigén kötőhelyeik segítségével specifikus módon felismerik, azaz hozzájuk kötődnek (http://drccercone.iculearn.com/bio2/wp-content/uploads/Lectures/immune%20system/Immune_system10.html).





3. ábra. a) A keresett célszekvencia detektálása annak komplementerével történő hibridizációja során (<http://eng.thesaurus.rusnano.com/upload/iblock/ca8/biochip1.jpg>). b) A baktériumok mozgásszervét alkotó flagelláris filamentumok több tízezer flagellin alegységből felépülő helikális szerkezetű fehérjepolimerek (<http://www.ks.uiuc.edu/Research/flagellum/images/flag-cg.jpg>, <http://www.ks.uiuc.edu/Research/flagellum/images/hook.jpg>). c) A molekuláris lenyomatok speciális polimermátrixban kialakított mesterséges célmolekula-kötőhelyek (<http://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/migrationresource4/G003942.gif>). d) A mesterségesen előállított aptamerek a célmolekulák térszerkezete alapján képesek specifikus felismerésre (http://www.rsc.org/chemistryworld/sites/default/files/upload/Ferguson_gallery-8_630.jpg).

A genetikai információt nukleinsavak, pontosabban dezoxiribonucleinsavak (DNS) és ribonucleinsavak (RNS) hordozzák. A nukleinsavak egymáshoz kapcsolódó molekulák, úgynevezett nukleotidbázisok (adenin, citozin, guanin, DNS-ben timin, míg RNS-ben uracil) lineáris polimerei. Ezen bázisok komplementer párokba rendezhetők (adenin – timin/uracil, citozin – guanin), így minden nukleotidsorozat rendelkezik egy hozzá tartozó komplementerszekvenciával, amellyel hibridizálható. A nukleinsavak ezen elemi tulajdonsága kézenfekvő lehetőséget kínál tetszőleges polinukleotid megkötésére, detektálására: elegendő mindössze a keresett célszekvencia komplementerének megfelelő nukleinsav-molekulákat a szenzorfelülethez rögzítenünk, hogy a bevezetőben bemutatott célmolekula megkötést és bioérzékelést megvalósítsuk (3.a ábra).

A módosított felismerőelemek további perspektivikus képviselői a flagelláris filamentumok, amelyek a baktériumok mozgásszerveinek sejten kívüli, filamentáris elemei (3.b ábra) [6]. Ezen fehérjeszálak több százezer monomer alegységből, flagellinfehérjéből állnak. A fehérjeszálak polimerizációs és degradációs tulajdonságainak vizsgálata során világossá vált, hogy a filamentumokat alkotó flagellinek egyik, a szálból kifelé nyúló alegysége nem vesz részt a szerkezet kialakításában, ezért kiváló célpont génebézészeti beavatkozásokra. Genetikai módosításokkal elérhető,

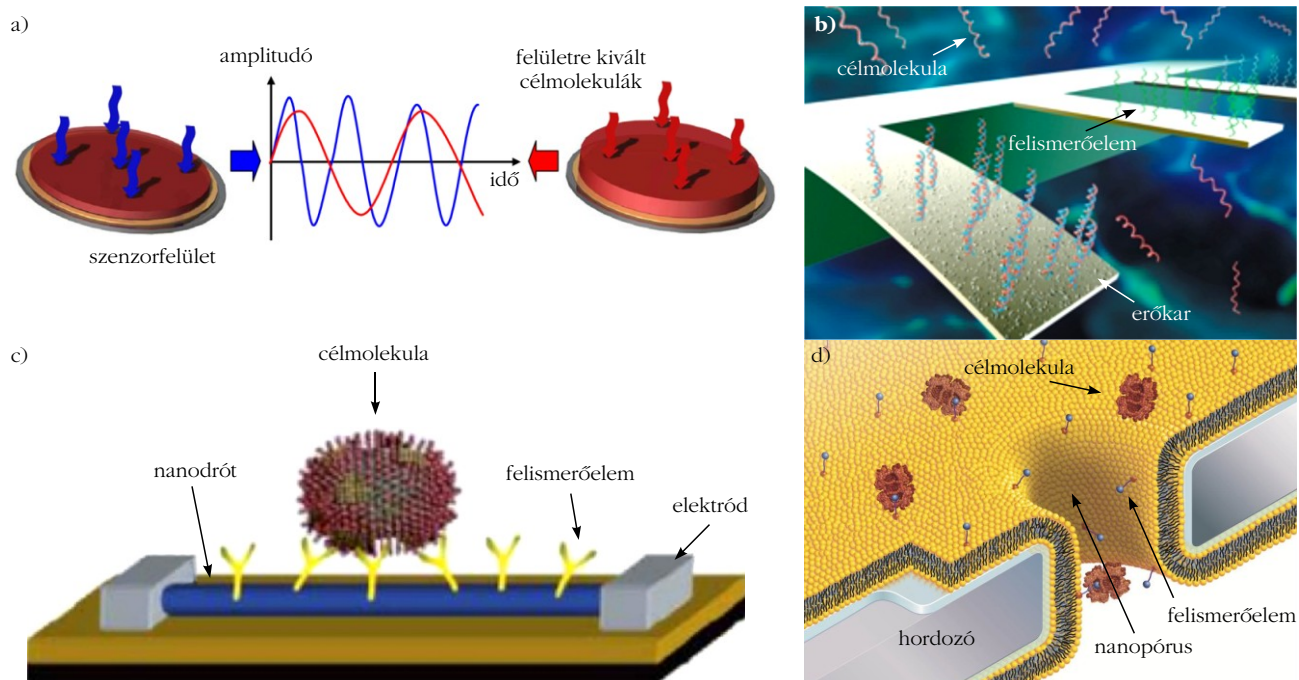
hogy ez a külső egység bizonyos célmolekulák megkötésére specializálódott felismerőelemmé váljék. Ezután a mutáns gént hordozó baktériumokat szaporítják, majd a filamentumokat leválasztják, és nagy felismerőelem-sűrűséggel jellemezhető alkalmazásokban hasznosítják.

Mesterséges felismerőelemek

A mesterséges felismerőelemek olyan anyagok, amelyeket a már megismert természetes rendszerek mintájára laboratóriumi körülmények között állítanak elő. Ilyenek például a molekula-nyomatok, vagy éppen a különféle szintetikus nukleinsavak és aminosav-polimerek. Ezen modern megoldások számos bioszenzorikai alkalmazása látott már napvilágot.

Felismerőelemként alkalmazhatóak az említett molekuláris lenyomatok (angolul *molecular imprints*), amelyek működésének kulcsa a térszerkezet alapján történő felismerés. Ehhez először egy speciális polimermátrixba lenyomatot készítenek a célmolekulákról, majd az így kapott lenyomatot, mint negatívot használják fel arra, hogy a megfelelő célmolekulát a térszerkezeti komplementaritás alapján megkötésük (3.c ábra).

Az aptamerek jellemzően az élő szervezetek genetikai információját kódoló RNS- és DNS-molekulákhoz képest igen rövid, mesterségesen megtervezett



4. ábra. a) A kvarckristály mikromérleg szenzorfelületére kivált célmolekulák eltolják a rendszer rezonanciafrekvenciáját (http://www.mdpi.com/sensors/sensors-08-00561/article_deploy/html/images/sensors-08-00561f6-1024.png). b) A mikro- és nanomechanikus erőkarok a felületükre kivált célmolekulák súlyának hatására lehajlanak, illetve rezonanciafrekvenciájuk eltolódik (<http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v285/n3/pdf/scientificamerican0901-66.pdf>). c) A felismerőelemekkel borított nanodrót vezetési tulajdonságait a bekötődő célmolekulák módosítják (http://cml.harvard.edu/assets/MRSBull_32_142.pdf). d) A nanopórusok belső felületén található felismerőelemek által megkötött célmolekulák csökkentik az effektív pórusátmérőt, így az átfolyó ionáramot is (<http://ns.umich.edu/Releases/2011/Feb11/nanopore1.jpg>).

és előállított oligonukleotid molekulák; továbbá bizonyos szintetikus aminosav-polimerek, az úgynevezett fehérje-aptamerek is ide sorolhatók. Ezen felismerőelem-típus különlegessége abban rejlik, hogy előállítása során megtervezhető, mely biomolekulák, fehérjék vagy akár sejtek megkötésére legyen képes. A felismerés itt is a molekulák térszerkezetével áll kapcsolatban (3.d ábra). Míg például a nukleinsav-nukleinsav reakcióknál a bázissorrend, addig aptamer-fehérje kölcsönhatás esetén a negyedleges térszerkezet játszik molekulafelismerő szerepet. E felismerőelemek is gyakori eszközei a bioszenzorikai alkalmazásoknak.

Jelátalakítók – főbb fizikai elvek és mérőberendezések bemutatása

Az előzőekben bemutatott biológiai felismerőelemek a bioszenzorok érzékelőfelületén kémiai rögzített érzékelőréteget alkotnak, amely réteg fizikai tulajdonságai a célmolekulákkal történő kölcsönhatás során módosulnak. E fizikai változások lehetnek akár molekulakomplexek képződése által kiváltott tömegnövekedés, kémiai reakciók során bekövetkezett energetikai változás, illetve a célmolekula jelenlétével kiváltott optikai vagy elektromos tulajdonságok módosulása is, amelyeket a jelátalakító egység formál jellemzően elektronikusan feldolgozható jellé. A következő alfejezetekben a jelátalakítók főbb típusait, működésük fizikai alapjait fogjuk bemutatni.

Tömegérzékeny jelátalakítók

A tömegérzékeny jelátalakítók által vizsgált fizikai mennyiségek jellemzően a felismerőelemek által megkötött célmolekulák össztömegének függvényei. Ezen mennyiségek lehetnek statikusak vagy dinamikusak, mint például a megnövekedett súlyerő okozta deformáció mértéke vagy valamilyen rezgő rendszer sajátfrekvenciájának elhangolódása.

E jelátalakító-család legismertebb képviselője a kvarckristály mikromérleg (angolul *quartzcrystal microbalance – QCM*). A mérési elrendezés alapját egy AC áramforrás segítségével rezonanciafrekvencián gerjesztett kvarckristály-lapocskára képezi, amely egyben a rendszer felismerőelemekkel bevont érzékelőfelülete is. A rezonanciafrekvencián oszcilláló felülethez kötődő célmolekulák hatására a rezgő kristálylap össztömege megnő, amely a tömegmegváltozással arányosan eltolja annak rezonanciafrekvenciáját, a rezonanciafrekvencia megváltozásának mértékéből pedig következtethetünk a kivált célmolekulák mennyiségére (4.a ábra).

Tömegérzékeny jelátalakító-eszközök a mikro- és nanomechanikus erőkarok (angolul *micro- and nanomechanical cantilevers*). Ezek a mikro-, illetve nanométeres mérettartományba eső, felismerőelemekkel borított rezgő nyelvek a felületükre kötődő célmolekulák súlyának hatására lehajlanak (4.b ábra). A lehajlás mértéke információt szolgáltat a kivált célmolekulák mennyiségéről. Ezen, úgynevezett statikus mérési üzemmódon túl lehetőség van dinami-

kus mérések végzésére is, amelyek során – a QCM-hez hasonlóan – a gerjesztett erőkarok rezonanciafrekvenciájának megváltozását követik nyomon, és ebből következtetnek a kiváló célmolekulák mennyiségére.

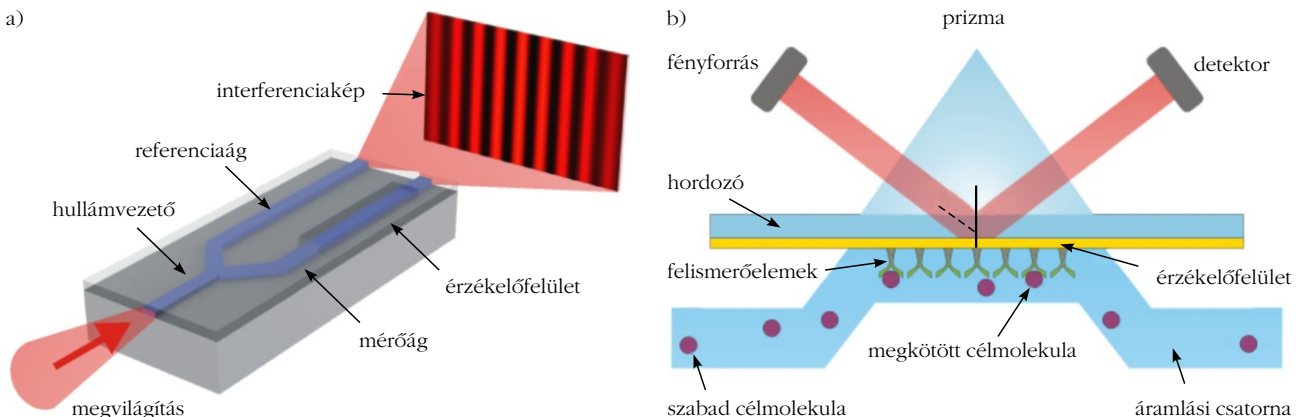
Elektrokémiai jelátalakítók

A célmolekula – felismerőelem kölcsönhatás következtében jelentkező, a rendszer valamely elektromos tulajdonságának időbeli megváltozását nyomon követő eszközök az elektrokémiai jelátalakítók. A vizsgált tulajdonságok lehetnek a rendszerben ébredő potenciálkülönbség (potenciometria), a benne folyó áram nagysága (amperometria) vagy annak elektromos vezetőképessége (konduktometria).

Fontos elektrokémiai jelátalakító típust képviselnek az elektronikából is jól ismert tervezérlésű tranzisztorok működési elvén alapuló nanodrótok (angolul *nanowire*). Ezen jelátalakítókat egy szubmikrométeres tranzisztor és annak két pólusát összekötő néhány nanométer átmérőjű és néhány száz nanométer hosszúságú félvezető szál alkotja. A szálát megfelelő felismerőelemekkel funkcionálizálva elérhető, hogy a bekötődő célmolekulák által kapuzott tranzisztort kapjunk (4.c ábra). A szál vezetési tulajdonságait folyamatosan vizsgálva következtetések vonhatók le a bekötött célmolekulák mennyiségéről.

Rendkívül perspektivikus elektrokémiai jelátalakítók a nanocsatornák (angolul *nanopores*). A nanocsatornák lehetnek szilárd testekben (például ionimplantációval) létrehozott, vagy vizes közegben elhelyezkedő, mesterséges membránrendszerekbe integrált csatornafehérjék által alkotott apró pórusok. A rajtuk átfolyó, célmolekulákat tartalmazó elektrolitoldat ionárama a csatorna két oldalán elhelyezett elektródák segítségével mérhető. A nanocsatornák felismerőelemekkel borított belső falán a célmolekulák megköthetők (4.d ábra). A bekötődés következményeként a csatornák belső átmérője leszűkül, és így az ionáram csökken, amelynek mértéke a megkött célmolekulák mennyiségét jellemzi.

5. ábra. a) A hullámvezető alapú interferometrius jelátalakító mérőágában terjedő fénymódus fázisa a mintával történő kölcsönhatás következtében a referenciaágban terjedőéhez képest eltolódik, amelynek mértékére az interferenciamentázat változásából következtethetünk [3]. b) A klasszikus SPR elrendezésben a gerjesztő fény egy prizma keresztül jut a felismerőelemekkel borított érzékelőfelülethez, amelyen megfelelő beesési szög esetén megvalósul a plazmonkeltés.



Optikai jelátalakítók

Az optikai jelátalakítók működésének alapja, hogy a vizsgáló fény kölcsönhat a felismerőelemek alkotta réteggel, és ennek következtében megváltozik például az intenzitása, hullámhossza, fázisa vagy polarizációs állapota. Mivel e változás mértéke a felismerőelem-réteg által megkött célmolekulák mennyiségével arányos, a mért jel feldolgozásával bioszenzorikai vizsgálatokat végezhetünk.

Elterjedt optikai jelátalakítók az optikai hullámvezető interferométer-érzékelők [3], amelyek kihasználják, hogy a környezetéhez képest magas törésmutatójú hullámvezető-vékonyrétegben teljes visszaverődéssel terjedő fénymódus úgynevezett evanescens mezője exponenciálisan lecsengő módon, tipikusan 100-200 nm mélységig behatol a vékonyréteg környezetébe és így kölcsönhat azzal. Amennyiben az evanescens mező által vizsgált felületet (azaz a hullámvezető-vékonyréteg felületét) felismerőelemekkel borítjuk, a bekötődő célmolekulák és az evanescens hullámok kölcsönhatásának következményeképp a terjedő fénymódus fázisa egy referenciamóduséhoz képest eltolódik. E két módus interferenciájából megszülető interferenciakép változásából a célmolekulák mennyiségére következtethetünk (5.a ábra).

Napjaink gyakran hivatkozott bioszenzorikai eljárása az úgynevezett felületplazmon-rezonancia spektroszkópia (angolul *surface plasmon resonance spectroscopy* – SPR). E módszer kihasználja, hogy amennyiben a mintát megvilágító fény frekvenciája egybeesik a minta elektronrendszerének rezonanciafrekvenciájával, az elektronrendszer gerjeszthető. Bioszenzorikai alkalmazások esetén ez a plazmonkeltés egy hordozóra (például üvegprizmára) párologtatott vékony, hozzávetőlegesen 50 nm vastag aranyrétegben történik. Amennyiben az aranyréteg hordozóval átellenes oldalát felismerőelemekkel borítjuk, a célmolekulák bekötődésének hatására a rezonanciafrekvencia elhangolódik (5.b ábra). Ez az elhangolódás például a gerjesztő fény beesési szögének hangolásával kimérhető, és így a célmolekulák mennyisége becsülhető.

Kitekintés

Az elmúlt több mint ötven év sikerének tekinthető, hogy az előbbieken bemutatott bioérzékelő-rendszerek és mérőeszközök mára már széles körben elterjedtek. A terület dinamikus fejlődését és térhódítását látva könnyen elképzelhető, hogy ugyanúgy, ahogy ma a mobiltelefonok, a jövőben ezek is mindennapjaink részét képezik majd. Ehhez azonban nem csupán e készülékek érzékenységén és a mérések megbízhatóságán kell javítani, valamint nem elegendő az árakat csökkenteni. Olyan kis méretű alkalmazásokat kell építeni, amelyek folyamatos és nem invazív módon képesek detektálni úgy, hogy mindközben a lehető legkevesebb minta felhasználásával a lehető legtöbb paraméter együttes meghatározását teszik lehetővé. Az ilyen irányú törekvéseket a lab-on-a-chip fejlesztések segítik, amelyek célja a miniatürizált diagnosztikai laboratóriumok chip méretű megvalósítása. Ezen eszközök lehetőséget nyitnak a point-of-care vizsgálatokra is, amelyek a beteg közvetlen közelében, az orvosi rendelőben, a kórházi ágy mellett, otthonainkban vagy akár a mentőautóban is gyors és széleskörű vizsgálatok elvégzését te-

szik lehetővé. A miniatürizált laborkészülékkel akár néhány percen belül elvégezhető helyszíni tesztek a vizsgálatot végző orvos számára azonnali és rendkívül fontos információt szolgáltatnak majd a beteg állapotáról. A gyors és pontos diagnózis alapján történő azonnali beavatkozás pedig életet menthet.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők hálával tartoznak Horváth Gábornak, valamint a Balassi Intézetnek a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíj keretén belül nyújtott támogatásáért.

Irodalom

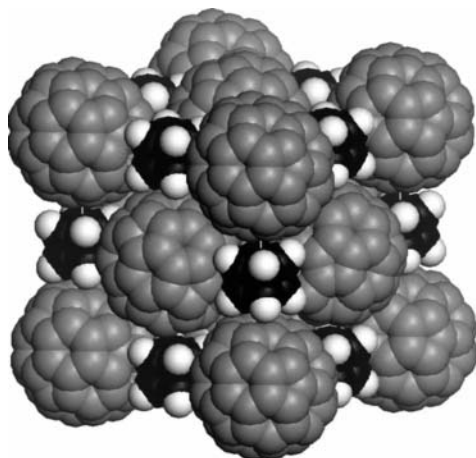
1. L. C. Clark, C. Lyons: Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 102(1962) 29–45.
2. A. P. F. Turner: Preface. In: A. P. F. Turner, I. Karube, G. S. Wilson (eds.): *Biosensors: Fundamentals and Applications*. Oxford Univ. Press (1987) pp. v–vii.
3. P. Kozma, F. Kehl, E. Ehrentreich-Förster, C. Stamm, F. F. Bier: Integrated planar optical waveguide interferometer biosensors: A comparative review. *Biosens. Bioelectron.* 58 (2014) 287–307.
4. M. S. Z. Kellermayer: Visualizing and manipulating individual protein molecules. *Physiol. Meas.* 26 (2005) R119.
5. I. Derényi: *A biofizika alapjai*. http://angel.elte.hu/~derenyi/A_biofizika_alapjai.pdf, 2013.
6. K. Namba, F. Vonderviszt: Molecular architecture of bacterial flagellum. *Q. Rev. Biophys.* 30 (1997) 1–65.

KUBÁN-FULLERÉN KOKRISTÁLYOK FÁZISÁTALAKULÁSÁNAK INFRAVÖRÖS SPEKTROSKÓPIÁS VIZSGÁLATA

Németh Gergely, Klupp Gyöngyi, Kováts Éva, Pekker Sándor, Kamarás Katalin
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet

A magas szimmetriájú $C_{60} \cdot C_8H_8$ kristály a rotor-sztator rendszerek alapvegyülete (1. ábra) [1, 2]. A kristályban a sztator szerepét a konkáv felületű kubán játssza, míg a rotor szerepét a fullerén. A gömbszerű fullerén forgása alacsony hőmérsékleten drasztikusan lelassul és 140 K körül a lapcentrálalt köbös szerkezet átalakul rombossá. Ezt a változást spektroszkópiái

1. ábra. A kubán-fullerén lapcentrálalt köbös kokristály modellje.



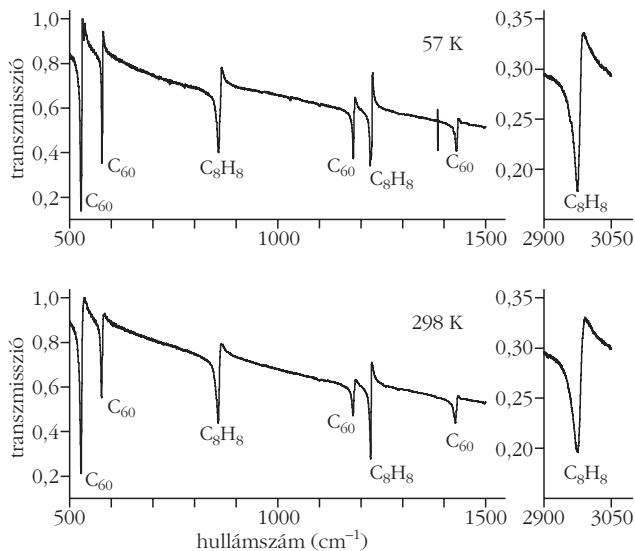
módszerekkel meg lehet figyelni. A lelassult forgás következtében a kristályban a molekulák környezetük hatására, meghatározott szimmetriát vesznek fel. Ez kisebb a C_{60} eredeti magas szimmetriájánál, így a rezgési gerjesztések vonalai felhasadnak. A hőmérsékletet 50 K-től 300 K-ig változtatva infravörös spektroszkópiával követtük a bekövetkező fázisátalakulást.

A korábban detektált rombos szerkezetnek öt különféle tércsoport is megfelel, amelyek közül a röntgendiffrakciós mérések részletes analízise és a kohé-

1. táblázat

C_8H_8 és C_{60} situs szimmetriái különböző tércsoportok esetén

	C_{60} (situs)	C_8H_8 (situs)	
P_{212121}	C_1	C_1	D_2
P_{mc21}	C_s	C_s	C_{2v}
P_{mm21}	C_s	C_s	\bar{C}_{2v}
P_{na21}	C_1	C_1	C_{2v}
P_{nma}	C_s	C_s	D_{2b}



2. ábra. $C_{60}\bullet C_8H_8$ kristály infravörös spektrumai alacsony és magas (szoba) hőmérsékleten.

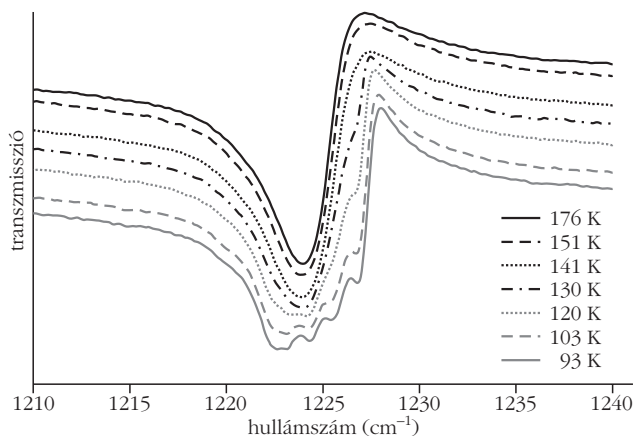
zióenergia-számolások a P_{nma} tércsoportra vezettek (1. táblázat) [2]. Csoportelméleti számolásokat kísérleteinkkel összevetve megállapítottuk, hogy az infravörös spektrumban talált felhasadások egyértelműen alátámasztják ezt a tércsoportot.

Mérési módszer

A mérést Fourier-transzformációs spektrométerrel végeztük. A mérendő pormintából kálium-bromid pasztillát készítettünk, amely egyrészt az erősen abszorbens anyag hígítására szolgál, másfelől a részecskeken való fényszórást csökkenti. 57 K hőmérsékletű mintán több próbát végezve, $0,25\text{ cm}^{-1}$ felbontásra volt szükség a felhasadás értékelhető megfigyeléséhez.

A felhasadások elméleti meghatározása céljából, az úgynevezett korrelációs módszerhez [3] fordultunk. Ezzel meghatározható, hogy ha az adott pontcsoportú molekula a megfelelő situs szimmetriájú pontcsoportba torzul, hogyan hasadnak fel a degenerált rezgési

3. ábra. A kubán 1224 cm^{-1} -nél lévő elnyelési vonalának felhasadása a hőmérséklet csökkenésével.



2. táblázat

Korrelációs táblázat különböző pontcsoportba történő torzulások esetén

$I_b \rightarrow$ T_{1u}	$C_1 \rightarrow$ $3A$	D_2 $3(A + B_1 + B_2 + B_3)$	12 db
$I_b \rightarrow$ T_{1u}	$C_s \rightarrow$ $2A' + A''$	C_{2v} $2(A_1 + B_1) + B_2$	5 db
$I_b \rightarrow$ T_{1u}	$C_1 \rightarrow$ $3A$	C_{2v} $3(A_1 + B_1 + B_2)$	9 db
$I_b \rightarrow$ T_{1u}	$C_s \rightarrow$ $2A' + A''$	D_{2b} $2(B_{1u} + B_{3u}) + B_{2u}$	5 db

módusok. A számolás során az I_b (C_{60}) és O_b (kubán) minden irreducibilis reprezentációját redukálni kell a megfelelő torzult pontcsoportok szerint. Példának okáért a T_{1u} reprezentáció karakterei a C_s pontcsoportban (C_{60} esetén):

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{R} & \mathbf{E} & \sigma_b \\ \chi_R(T_{1u}) & 3 & 1 \end{array}$$

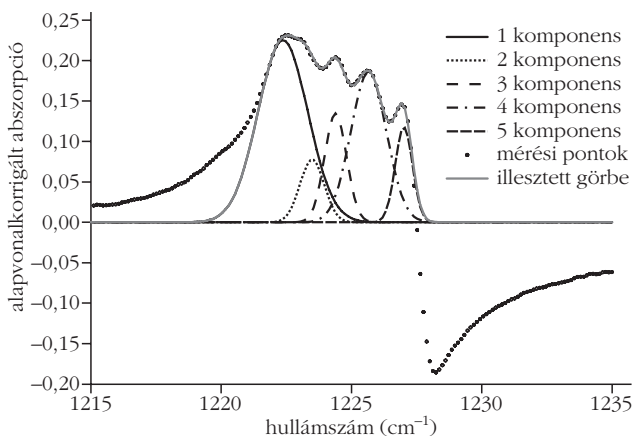
Tovább a redukciós képletből számolhatunk:

$$n(\Gamma_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=R}^2 \chi_R(T_{1u}) \chi_R(\Gamma_i).$$

Ha egy elemi cellában több inekvivalens ugyanolyan situs szimmetriájú molekula van, azok rezeghetnek azonos és különböző fázisban is. Az eltérő fázisú rezgések kissé eltérő frekvenciákon jelennek meg, ez a Davydov-felhasadás. Meghatározásához az adott pontcsoport irreducibilis reprezentációit kell összevetnünk a kristály tércsoportjához tartozó pontcsoportéval. Az infravörös spektrumban a T_{1u} módus felhasadásait a 2. (korrelációs) táblázat foglalja össze a kubán esetén.

A 2. ábrán a minta infravörös spektrumának számunkra releváns részei láthatók 57 K, illetve 298 K hőmérsékleten.

4. ábra. A kubán 1224 cm^{-1} -nél lévő elnyelési vonalának felhasadása az 5 illesztett csúccsal.



Ha ebből kiemeljük a kubán 1224 cm^{-1} -nél lévő elnyelési vonalát (3. ábra), és a különböző hőmérsékleten szemügyre vesszük látható, hogy 140 K környékén figyelhető meg az átalakulás. Továbbá észrevehető, hogy 5-szörös felhasadás következett be, amit a 4. ábrán illesztéssel is bizonyítottunk.

Az illesztés alapján látható, hogy ötszörös felhasadás jött létre. Ennek alapján kizárható a $P_{2,2,2}$ és a P_{na2} tércsoport. A maradék 3 tércsoport közötti döntésben a kis intenzitású csúcsok száma adja meg a választ. Mivel csak kevés ilyen csúcs jelent meg, ezért arra lehet következtetni, hogy a legmagasabb szimmetriájú tércsoport valósul meg. Ez pedig a röntgen-

diffrakciós mérések által megmutatott P_{nma} tércsoportra vezet, mivel e tércsoport pontcsoportja a legmagasabb szimmetriájú.

Irodalom

1. G. Bortel, S. Pekker, É. Kováts: Low Temperature Structure and Supramolecular Interactions of the C_{60} -Cubane Cocrystal. *Crystal Growth Design* 11 (2011) 865–874.
2. S. Pekker, É. Kováts, G. Oszlányi, G. Bényei, G. Klupp, G. Bortel, I. Jalsovszky, E. Jakab, F. Borondics, K. Kamarás, M. Bokor, G. Kríza, K. Tompa, G. Faigel: Rotor-stator molecular crystals of fullerenes with cubane. *Nature Materials* 4 (2005) 764–767.
3. W. G. Fateley, F. R. Dolish, N. T. McDavitt, F. F. Bentley: *Infrared and Raman Selection Rules for Molecular and Lattice Vibrations: The Correlation Method*. Wiley-Interscience, 1972.

KÉSEI MEGEMLÉKEZÉS SOMOGYI ANTALRÓL

Uray László
Budapest

Hajdani professzorom és szakdolgozatom témavezetője, *Somogyi Antal* életének kilencvenedik évében, 2010 októberében hunyt el, de haláláról csak később, a *Fizikai Szemléből* értesültem, ahol három munkatársa (*Erdős Géza*, *Kecskeméty Károly* és *Király Péter*) számolt be munkásságáról [1]. Már ekkor felmerült bennem a gondolat, hogy nekem is kellene írnom a hozzá kapcsolódó emlékeimről.

Én magam korán elkerültem a KFKI-ból, a kozmikus sugárzás fizikájától távol eső területen dolgoztam (fémfizika, különös tekintettel a volfrámra). Úgy érzem, hogy a *Fizikai Szemle* olvasói számára tanulságos lehet, ha felidézem emlékeimet a KFKI-ban az 1960-as évek elején végzett kozmikus sugárzási kutatásokról. Az elemi részecskék gyorsító vizsgálata legtöbb országban ekkor még gyermekcipőben járt, és a nagyenergiájú fizika kutatói gyakran a kozmikus sugárzást használták olcsó, bár eléggé kis intenzitású forrásként. Azóta sokszorosára nőtt a gyorsítókkal elérhető energia, de még mindig nagyságrendekkel elmarad a Földünk légkörébe érkező kozmikus sugárzási részecskék legnagyobb energiájától.

Így kerültem kapcsolatba a kozmikus sugárzási kutatásokkal

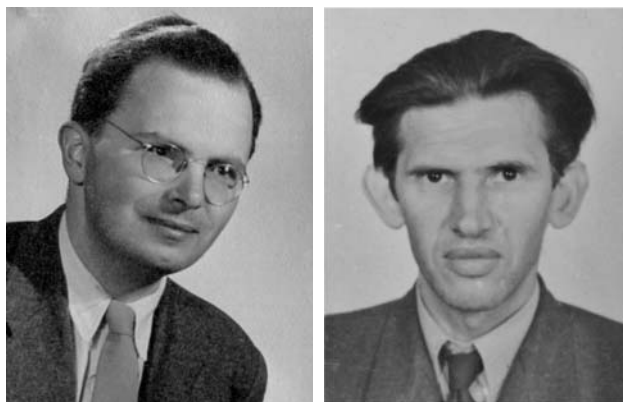
Egyetemi tanulmányaimat az ELTE Természettudományi Kara Fizikus Szakán végeztem 1956–61 között. Szakdolgozatom témájaként a kozmikus sugárzást választottam, talán mert ez a téma érdekesnek látszott a modern magfizika szempontjából, és mert a téma ismerős volt *Jánossy Lajos A kozmikus sugárzás* című népszerű könyvéből [2], amit már középiskolásként olvastam. A kozmikus sugárzás témaválasztással ke-

rültem Jánossy professzor tanszékére, ahol a szakdolgozatomat Somogyi Antal (1. ábra) irányítása alatt készítettem el.

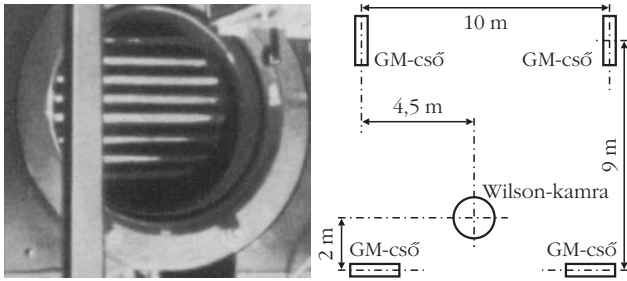
Jánossy Lajos, aki a kozmikus sugárzás tanulmányozásában és kutatásában nemzetközileg elismert hírnevet szerzett, a KFKI-ban a beérkező nagyenergiájú kozmikus sugarak vizsgálatára egy koincidenca-berendezéssel működő soklemezű Wilson-féle ködkamrát építtetett [3].

Az már akkoriban is ismert volt, hogy a Föld légkörébe elég nagy energiával érkező protonok vagy más atommagok a felső légkörben töltött vagy semleges π - és K-mezonokat (pionokat és kaonokat) és más elemi részecskéket hoznak létre, majd a semleges pionok két gamma-fotonra bomlanak, míg a töltött pionok részben további kölcsönhatásokban újabb pionokat és egyéb erősen kölcsönható részecskéket keltenek, részben nagy áthatoló képességű müonokká bomlanak. A semleges pionok a légkörben elektronokból és gamma-sugarakból álló elektromágneses kaszkádokat keltenek. Ha a légkörbe belépő részecske energiája elég nagy, akkor a kiterjedt légizáporok egyes részecskéi a tengerszintig is eljut-

1. ábra. Somogyi Antal és Jánossy Lajos.



Köszönetet mondok Király Péternek, aki eredeti kéziratomat átnézte, javította és a kozmikus sugárzási kutatások újabb fejleményeivel kibővítette, valamint Kecskeméty Károlynak a hasznos konzultációkért.



2. ábra. Balra a kozmikus sugárzás vizsgálatára szolgáló soklemez-es Wilson-kamra [9]. Jobbra a Wilson-kamrához épített 4 darab GM-csővel vezérelt koincidencia-berendezés [5].

nak, míg kisebb energiák esetén csak magas hegyeken figyelhetők meg. A kozmikus sugárzási témakör kapcsolódott Jánossy Lajos *Valószínűségszámítás* című előadásához, amelyhez később gyakorlatokat vezettem. Szakdolgozati feladatom a koincidencia-berendezés által vezérelt soklemez Wilson-kamra segítségével készült felvételek (mintegy 14 ezer) átnevezése, kimérése és kiértékelése volt a maximum likelihood módszerrel (szokásos magyar elnevezése a legnagyobb valószínűség módszere). Maguk a ködkamrás felvételek nagyrészt az 50-es évek második felében készültek [3, 4].

Munkám során állandó megbeszélést folytathattam Somogyi Antallal, részletesen megvitatva az eredmények értelmezését. A vizsgálatok eredményeit az [5] és a [6] cikkekben írtuk meg, a kiértékelés és a számítás módját pedig [7]-ben részleteztük.

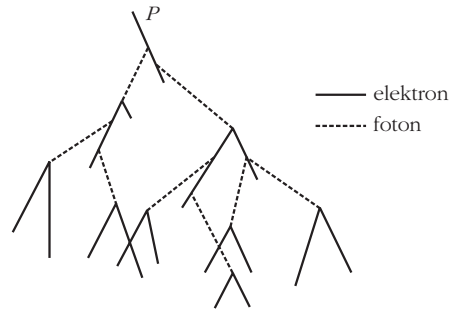
Mindezek alapján 1961-ben írtam meg *Kiterjedt légizáporok zenitszögeloszlása* című szakdolgozatomat [8].

A ködkamrafelvételek kiértékelése

A Wilson-kamra belseje a beépített 7 darab ólomlemezrel a 2. ábra bal oldalán látható, a hozzá épített 4 darab GM-csővel vezérelt koincidencia-berendezést pedig az ábra jobb oldala mutatja [5]. A Wilson-kamrát triggerelő koincidencia-berendezés biztosítja, hogy a Wilson-kamrában megjelenő részecskék valóban kiterjedt, vagyis elég nagy területen egyszerre lezúduló részecskézáporból származnak.

Feladatom a Wilson-kamrával készült felvételek kimérése és -értékelése volt a felső ólomlemez fölé érkező kozmikus sugárzási részecskék zenitszögeloszlása alapján. Ez a feladatom elsősorban Jánossy professzor statisztikai módszerének alkalmazását jelentette a Földünkre érkező nagyenergiájú kozmikus részecskék által keltett kiterjedt légizáporok kimérése és kiértékelése. A beérkező részecskék a levegőben bonyolult folyamatokban vesznek részt, amelyek során elektron-foton kaszkádzáporok is létrejönnek. Ezek sémáját a 3. ábra mutatja.

Ha az elsődleges részecskék (általában protonok) nagy energiával érkeznek a légkörbe, azok az egyes atommagokon csak kissé szóródnak, így a keltett zápor iránya is alig változik. A következő képen (4.



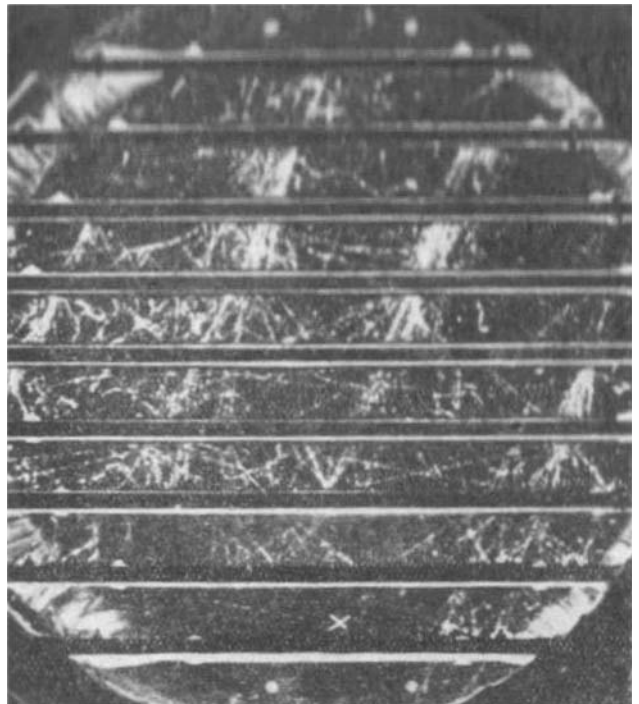
3. ábra. Az elektron-foton kaszkádzápor kifejlődésének vázlatos képe [2]. A kihúzott vonalak az elektronok, a szaggatott vonalak a fotonok nyomait jelzik. A rajzon a P primer elektron útközben fotonokat vált ki, a fotonok viszont egy-egy elektron-positron párt keltenek, és így tovább. A Wilson-féle ködkamrában csak az ionizáló elektronok és pozitronok nyomai láthatók, a fotonoké nem.

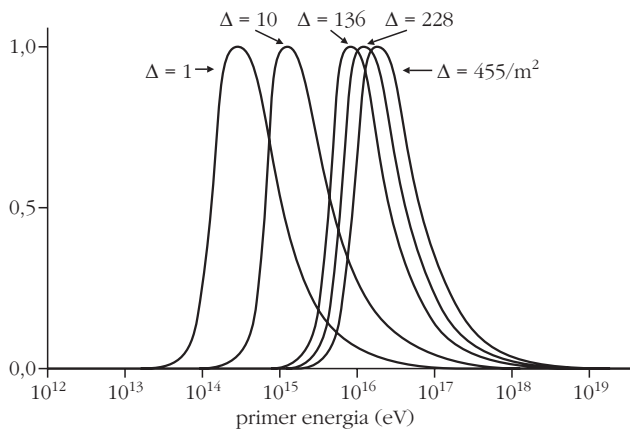
ábra) egy többszörös kaszkádzápor látható ([3]-ból véve), amely mutatja, hogy az elsődleges részecskéből kifejlődött részzáporok nagyjából megtartják az eredeti irányt.

A kiterjedt légizáporok a levegőben keletkező részecskék millióit tartalmazzák. Egy kaszkádfolyamatban szereplő több millió részecske kiváltásához a levegőben nagyságrendileg 10^{16} eV kezdeti energiára van szükség. Bár a légizáporok csak részben elektron-foton kaszkádzáporok, a más részecskék keltésére fordított energia a primer részecske energiájának becslésénél figyelembe vehető. Így egy kiterjedt légizáporban fellépő összes energia gyakran meghaladja a 10^{16} eV-ot, tehát a primer részecskének kívülről legalább ekkora energiával kellett a Föld légkörébe érkeznie.

Első közelítésben a záporban keletkező teljes N részecskeszám arányos a záport kiváltó részecske E_0

4. ábra. Egy többszörös kaszkádzápor képe [3]-ból átvéve.





5. ábra. Az E_0 primer energiák likelihood-függvényei néhány Δ részecskesűrűség mellett, függőlegesen beeső záporok esetén.

energiájával. Az adott szinten észlelhető részecskék száma viszont erősen változik aszerint, hogy milyen vastag légrétegen haladt át a zápor. Maximumát még a legnagyobb energiáknál és függőleges beesés esetén is a tengerszintnél magasabban éri el. A maximum szintje alatt a részecskeszám csökken, amit a primer energia becsülésénél figyelembe kell venni. Az észlelési hely (KFKI) tengerszint feletti magasságánál és az általunk vizsgált záporoknál ez a csökkenés erős, közel exponenciális volt.

A zápor irányát (pontosabban, annak a Wilson-kamra ablaksíkjára való vetületét) vagy a nagyobb energiájú részecskék irányából, vagy a beérkező párhuzamos részecskék irányából becsülhetjük. *P. C. Bhattacharya* [5]-ben az első módszert alkalmazta, míg én szakdolgozatomban a másodikot, majd a közös cikkben a két módszer eredményét össze is hasonlítottuk. Az egyezés nem volt tökéletes. A záporok csillapodási (attenuációs) hosszára, amit a záporok gyakoriságának zenitszögfüggése alapján határoztunk meg, a második módszerrel mintegy 15%-kal kisebb érték adódott. Mivel a záporok szerkezetére vonatkozó akkori modellek ma már nagyon kezdetlegesnek tűnnek, az eltérést nem kell csodálkoznunk.

A Wilson-kamrába felülről belépő közel párhuzamos részecskék száma alapján megbecsülhetjük a zápor felületi részecskesűrűségét (Δ/m^2). A legfelső ólomlemez területe 220 cm^2 , ezért ha a legfelső ólomlemez fölött 3, 5, vagy 10 nyomot találunk, az felel meg az 5. ábrán $\Delta = 136, 228$, illetve $455 \text{ elektron}/m^2$ sűrűségnek. (A $\Delta = 1$ és a $\Delta = 10$ -hez tartozó görbék csak összehasonlításként szerepelnek.) Az ábra függőlegesen beeső záporok esetére mutatja az ezen záporokat kiváltó primer energiák likelihood-függvényét. Látható, hogy az adott részecskesűrűségek esetén a primer energiák körülbelül 10^{15} – 10^{19} eV között voltak.

Azonos mért részecskesűrűség mellett a ferdén, θ zenitszög alatt érkező záporok primer energiája nagyobb, mint a vertikális (zenit irányából jövő) záporok esetén. Ennek oka, hogy a ferde záporok $1/\cos\theta$ faktoriall vastagabb légrétegen haladtak át. A szögeloszlásból így a záporok csillapítási (attenuációs)

hossza megbecsülhető. Kis komplikációt jelent, hogy θ helyett csak annak a kamra ablaksíkjára való vetületét ismerjük, de ezt a nehézséget egy megfelelő transzformációval korrigálhatjuk. A zenitszögeloszlást $A\cos^n\theta$ alakúnak feltételezve, és a mérésekben kapott részecskék számát Poisson-eloszlásúnak tekintve, az eredményeket a maximum likelihood módszerrel értékeltük ki. Így az egyes záporoknál n -re és az A záporgyakoriság-paraméterre becslést kaptunk. A kiértékelés részletei megtalálhatók [5], [6] és [7]-ben.

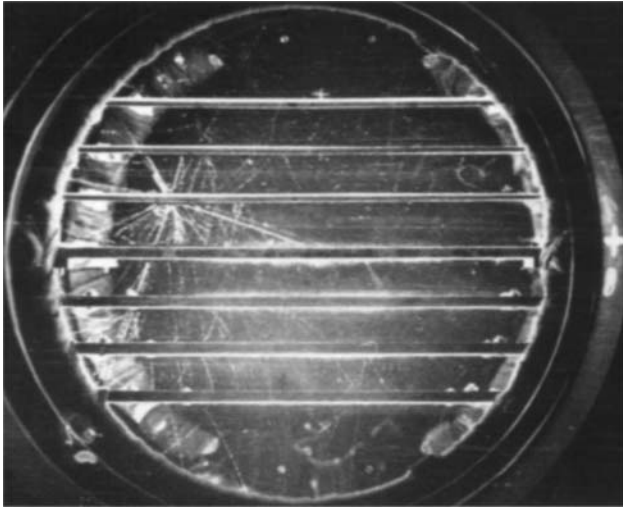
További megjegyzések

Somogyi Antallal történő megbeszéléseink jellemzésére kiemelek egy érdekességet. Számomra a kozmikus részecskék és a kozmikus légi záporok talán túlzottan is a reális valóságban léteztek, hiszen azok nyomait ott láttam a felvételeken, amit nekünk kellett megfigyelni és lemérni. Ha megbeszélés közben ilyeneket mondtam, akkor a professzor úr néha kijavított, hogy azok nem biztos, hogy a valóságban is úgy léteznek, hanem éppen azért mérünk és vizsgáljuk a felvételeket, hogy kutatásaink alapján ezek tulajdonságaira következtetéseket vonhassunk le és megállapításokat tehessünk róluk. Nekem ez ekkor kissé elvont elképzelésnek látszott.

Talán a kozmikus sugárzási témaválasztásom és a szakdolgozatom alapján szerzett gyakorlatom volt az oka, hogy Jánossy professzor megbízott, hogy a korai hatvanas években az előadásához kapcsolódó *Valószínűségi számítás* gyakorlatot vezessem a fizikus és a geofizikus hallgatók számára. Jánossy professzorral való ismeretségem – az előadásai látogatása mellett – főleg e gyakorlatvezetés során felmerült megbeszélésekkel volt kapcsolatos. Mind az előadásait hallgatva, mind ezen megbeszélések alapján úgy éreztem, hogy kiváló kutatót és jelentős fizikust ismertem meg benne.

A Wilson-kamra felvételek átnézése során több szép képet választottam ki, elsősorban azzal a céllal, hogy ezeket a szakdolgozatomba beilleszthessem. Ezek a felvételek – természetesen – elsősorban kozmikus légi záporokat mutatnak, de a szebb magfizikai eseményekre vonatkozó képeket is kiválasztottam. Ezeket a felvételeket Somogyi Antal örömmel vette, és azt mondta, hogy a későbbiekben még hasznos lehet nekünk. A képeket lemásoltatta, és a másolatokból az egyik sorozatot nekem adta. A mérések és azok kiértékelésének vázlatos leírása után e képekből is szeretnék néhányat bemutatni.

Az 1960-as évek közepén Somogyi Antal Angliában töltött néhány évet, ahol kiterjedt légi záporok kutatásában vett részt. Leeds közelében, a Haverah Parkban volt a világ akkori legnagyobb, mintegy 12 km^2 -re kiterjedő ilyen célú berendezése. Ottani tapasztalatai alapján úgy látta, hogy ezen a területen a nagy berendezéseké a jövő, és nem tudunk a nagy, gazdag állományokkal versenyezni. Ezért hazatérte után olyan témákra váltott, ahol csoportjával nemzetközi együtt-



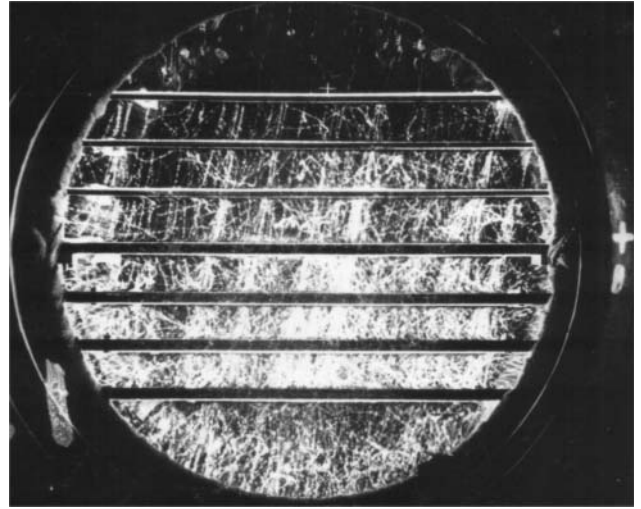
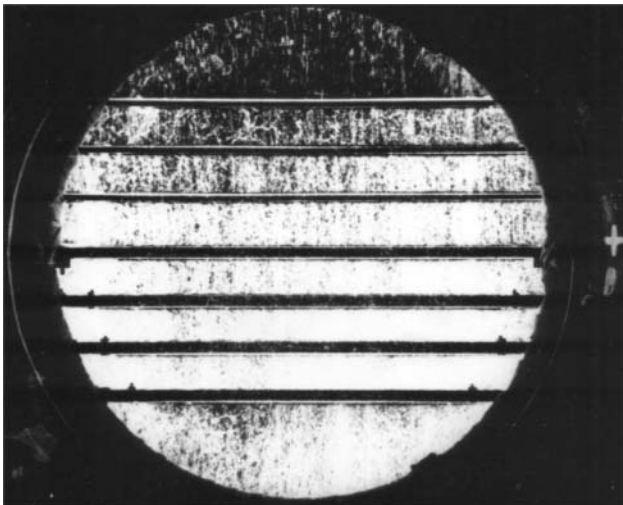
6. ábra. Jellegzetes magreakció képe, megtalálható az *Atommaglexikonban* [9], a XIX. képpoldalon.

működésben világszínvonalú kozmikus tárgyú kutatásokat tudott végezni.

Diplomám megszerzése (1961) után új munkahelyre kerültem (Újpest, MFKI), ahol *Millner Tivadar* irányítása alatt a Tungstam, majd a General Electric által gyártott volfrám fém és izzószál fizikai tulajdonságaival foglalkoztam. Az új témaválasztásomhoz az is hozzájárult, hogy a KFKI-ban a Matematikai Főosztályra kerülve úgy láttam, hogy a valószínűségszámítás megfelelő szintű műveléséhez matematikussá kellett volna képeznem magam, és én ekkor már több kedvet éreztem a fémfizika és az anyag tulajdonságainak vizsgálatához, ahol a kutatás tárgyát jobban rögzítve éreztem a „látható” anyaghoz, vagyis a volfrám fémhez.

Új témaválasztásom ellenére sem szűnt meg érdeklődésem a kozmikus sugárzás iránt, legalább az ismeretterjesztés szintjén nem. Így a *Fizikai Szemléből* értesültem Somogyi Antal haláláról. Ugyanekkor meglepve láttam, hogy az egykor általam kiválasztott, atommag-reakciót mutató képet az *Atommaglexikon* [9] is átvette (6. ábra).

8. ábra. Rendkívül sűrű, vertikális zápor, az alsó részeken gyakorlatilag lehetetlen megszámolni a részecskéket.



7. ábra. Sok, ferdén, párhuzamosan haladó részecskét tartalmazó zápor.

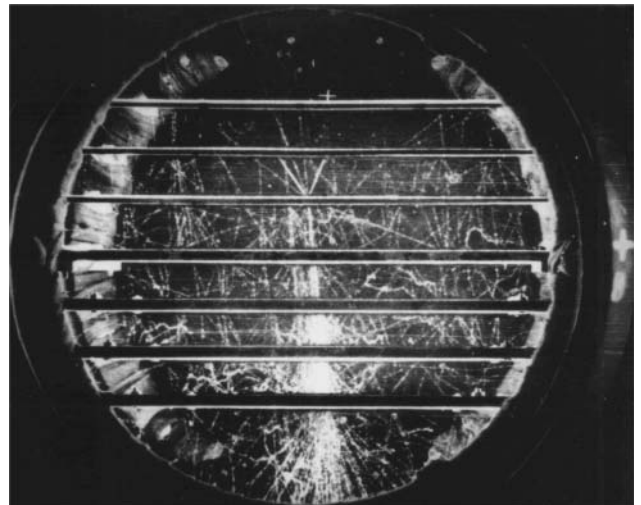
Néhány érdekes Wilson-kamra felvétel

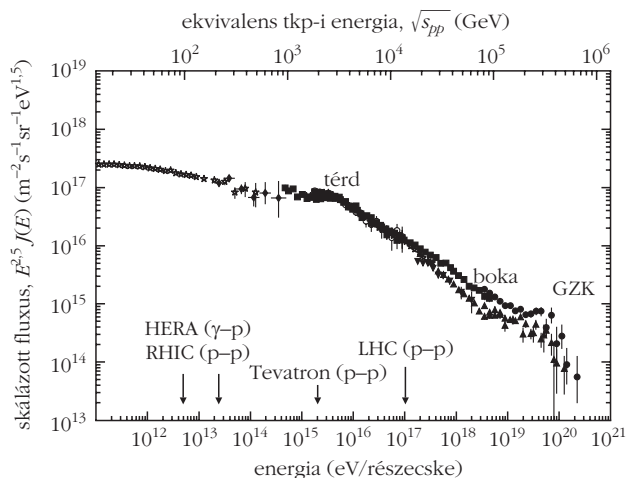
A KFKI-ban működő expanziós Wilson-kamrához eredetileg erős mágneses tér létrehozására alkalmas berendezést is terveztek, ez azonban sohasem készült el. Így a kamrában látható nyomok a szomszédos ólomlemezek között egyenesek, és nem teszik lehetővé a különböző töltésű és tömegű részecskék egyszerű azonosítását. Ízelítőként néhány jellegzetes képet mutatok be (7., 8. és 9. ábrák), részletesebb elemzés nélkül.

Miért érdekes ma is a kozmikus sugárzás, és mit várunk kutatásától?

A levegőt zárt edényben is ionizáló, nagy áthatoló képességű sugárzást a 20. század elején több kutató is megfigyelte. Annak felfedezését, hogy ez a sugár-

9. ábra. A kép itt is egy érdekes magreakcióval kezdődik, mint a 6. ábrán, azonban az egyik nagy energiájú részecske arra is képes, hogy további ólomlemezekben komoly kaszkádzáport keltsen.





10. ábra. A primer kozmikus részecskék spektruma az egyes részecskék energiájának függvényében. A jobb felismerhetőség kedvéért a görbe jellegzetes pontjait vagy görbületeit szokás „térd”, „boka”, illetve GZK-levágás néven emlegetni [12].

zás légkörünkön kívülről származik, főleg Victor Franz Hess 1912-es ballonkísérleteinek tulajdonítják, aki ezért 1936-ban megkapta a fizikai Nobel-díjat [10, 11]. A felfedezés jelentőségét mutatja, hogy az 1930-as évektől az 1950-es évek közepéig felismert elemi részecskék túlnyomó többsége a kozmikus sugárzás tanulmányozásának köszönheti megtalálását. Ebben az időszakban Jánossy Lajos és munkatársai is jelentős eredményeket értek el a kozmikus sugárzás vizsgálatá terén.

Az 1950-es évektől a kozmikus sugárzás kutatása több, egyaránt fontos irányban folytatódott. A nagy energiájú kölcsönhatások további vizsgálata mellett megjelent az űrkutatás, ami egyrészt a Föld és a Nap környezetében (a magnetoszférában, a Napon és a helioszférában) felgyorsult, különböző energiájú részecskék vizsgálatával, másrészt a galaktikus eredetű, de viszonylag kis energiájú kozmikus sugárzás összetételének és időbeli változásainak tanulmányozásáért is foglalkozik. Emellett egyre nagyobb fontosságot nyert a kozmikus eredetű gamma-sugárzás vizsgálata, amelynek azért nagy a jelentősége, mert a gamma-sugarak – a töltött részecskéktől eltérően – egyenes irányban terjednek, így forrásuk azonosítható, és hírt adnak a forrásban végbemenő részecskegyorsítási folyamatokról is. Egyre nagyobb jelentőséget nyer a neutrínók megfigyelése, amihez a Déli-sark alatti jégben köbkilométeres detektorrendszert alakítottak ki. Hatalmas föld alatti detektorrendszereket építettek ki a nagy energiájú müonok és neutrínók tanulmányozására, valamint egzotikus, ma még ismeretlen új elemi részecskék keresésére is. A magas légkörbe felbocsátott ballonokon és a Nemzetközi Űrállomáson is tanulmányozzák a kozmikus eredetű antirészecskéket.

A részecskefizikai kutatásokat az 1950-es évektől a részecskegyorsítók kifejlesztése és alkalmazása uralja, de a gyorsítókkal elért körülbelül 10^{10} eV-tól néhány-szor 10^{12} eV-ig terjedő részecskeenergiákhoz képest a kozmikus záporokat létrehozó részecskék energiája

továbbra is sokkal nagyobb. Emlékeztetünk arra, hogy a több, mint 50 éve végzett Wilson-kamrás vizsgálataink szerint a mért elektronsűrűségek a Föld légkörébe érkező 10^{16} – 10^{19} eV energiájú protonoktól származhattak. Fontos azonban megjegyezni, hogy a CERN-ben előállított részecskenyalábok intenzitása sok nagyságrenddel nagyobb, mint a kozmikus sugárzásé. Emellett a protonok szembeütköztetésével olyan nagy tömegközépponti ütközési energiát lehet elérni, ami már összevethető azzal, mint amikor a nagy energiájú kozmikus sugárzási részecskék a légkörbe csapódnak.

A Kövesi-Domokos Zsuzsa cikkéből [12] átvett 10. ábra a kozmikus sugárzás spektruma mellett a legfontosabb ütközőnyalábos gyorsítók ekvivalens energiáit is mutatja (például a vízszintes tengelyen a Tevatron vagy az LHC esetét).

A 10. ábra szerint a fluxus 10^{15} eV körül, az úgynevezett „térd” után gyorsabban csökkenésbe megy át, majd 10^{18} eV körül a görbe újra ellaposodik a „boka” névvel. Az extrém energiájú kozmikus sugarak a boka feletti tartományban vannak. Ez a tartomány lehetőséget ad a részecskefizika eddig ismeretlen területének feltárására. Az extrém nagy energiák tartományában ugyanis új részecskefizikai jelenségek léphetnek fel, amelyek a közös Standard modellel nem magyarázhatók.

Külön említést érdemel a néhány-szor 10^{19} eV feletti, úgynevezett GZK-levágás a spektrumban. Azt, hogy a spektrum ilyen energiákon jóval meredekebbé válik, már az 1960-as években, közvetlenül az egész Univerzumot kitöltő mikrohullámú háttérsugárzás felfedezése után megjósolták. A jelenség oka az, hogy az ilyen nagy energiájú protonok már kemény gamma-sugárzásként érzékelik a mikrohullámú sugárzást, és azzal kölcsönhatva pionokat keltenek, ami erősen korlátozza azt a távolságot, ahonnan a protonok el tudnak érni hozzánk.

Mivel az extrém nagy energiájú részecskék gyakorisága rendkívül kicsi, ezek csak nagy területről összegyűjtve, speciális technikákkal vizsgálhatók. Szerencsére itt segítséget nyújtanak a kiterjedt légizapok, amelyekben egyetlen, a légkörbe érkező részecske energiája a földfelszínen sok négyzetkilométeren részecskék milliárdjai között oszlik el. Ezek vizsgálatára sokáig a Japánban épített felszíni zápor-detektor, az AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) szolgált, ahol a detektorok körülbelül 100 km^2 -nyi területen voltak szétterítve. Ennek segítségével azonban még nem tudtak bizonyítékot találni a GZK-levágásra.

Később Argentínában hozták létre azt a mintegy háromezer négyzetkilométert lefedő hatalmas detektorrendszert, amely már megbízhatóan mutatta a GZK-levágást. E rendszer – a felszínen elhelyezett detektorok mellett – olyan érzékelőket is tartalmaz, amelyek a felső légkörben a záporok hatására létrejövő fluoreszcens fényt is detektálják (persze csak éjszaka). A berendezés neve Pierre Auger Observatórium lett, a kiterjedt légizapok francia felfedezőjének tiszteletére.

Irodalom

1. Erdős Géza, Kecskeméty Károly Király Péter: Somogyi Antal (1920–2010). *Fizikai Szemle* 60/12 (2010) 427.
2. Jánossy Lajos: *Kozmikus sugárzás*. Művelt Nép könyvkiadó, Budapest, 1954.
3. Kántor Károly, Zsdánszky Kálmán.: Automatikus üzemű Wilson-kamra kozmikus sugárzás vizsgálatára. *Magyar Fizikai Folyóirat* 6 (1958) 191–208.
4. Gémesy Tibor, Sándor Tamás, Somogyi Antal.: A kozmikus sugárzás kiterjedt légizaporainak vizsgálata Wilson-kamrával. *MTA KFKI Közl.* 8/1 (1960) 4–6.
5. P. C. Bhattacharya, T. Gémesy, T. Sándor, A. Somogyi, L. Uray: The attenuation length of extensive air showers in air. *Il Nuovo Cimento* 24 (1962) 290–300.
6. A. Somogyi, L. Uray: Determination of the absorption length from the angular distribution by means of the method of maximum likelihood. *Supplemento al Nuovo Cimento* 26 (1962) 358–363.
7. Somogyi Antal, Uray László: Exponenciális abszorpció paramétereinek meghatározása irányeloszlásból a legnagyobb valószínűség módszerével. *MTA KFKI Közl.* 10 (1962) 403–422.
8. Uray László: *Kiterjedt légizaporok zenitszögeloszlása*. Diplomamunka, ELTE, Budapest, 1961.
9. Jánossy Lajos (főszerkesztő): *Atommaglexikon*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1963.
10. Somogyi Antal: A kozmikus sugárzás felfedezésének 50. évfordulójára. *Fizikai Szemle* 12/5 (1962) 133.
11. Király Péter: Jánossy Lajos és a 100 éve felfedezett kozmikus sugárzás. *Fizikai Szemle* 62/12 (2012) 400–406.
12. Kövesi-Domokos Zsuzsa: Kozmikus sugárzás extrém energiákon, I. és II. rész. *Fizikai Szemle* 62 (2012) 234–239., valamint 298–300.

A FIZIKA TANÍTÁSA

RÉSZECSKEFIZIKA TANÍTÁSA A KUTATÓLABORBAN

Oláh Éva Mária

ELTE TTK Fizikatanári Doktori Iskola
Mechatronikai Szakközépiskola, Budapest

A részecskefizika oktatása a középiskolában nem könnyű feladat. A témakör a tanmenetben nem szerepel, a tankönyvek legtöbbször utalást sem tesznek a mikrorészecskék létezésére. Viszont a 21. század elején, amikor szinte naponta értesülünk a részecskefizikai kutatások legújabb eredményeiről, nagyon fontos lenne, hogy a média által több-kevesebb sikerrel kommentált eseményeket valamilyen módon közelebb vigyük a diákokhoz.

Szerencsés helyzetben van egy budapesti iskola, a Mechatronikai Szakközépiskola hét diákja, akik heti rendszerességgel részt vehetnek a Wigner Fizikai Kutatóközpont Nagyenergiás Fizikai Osztályán dolgozó detektorfizikai csoport munkájában. Itt bepillantást nyerhetnek a Detektorlaborban folyó kutatásba, olyan fizikusoktól tanulhatják az elemi részecskék elméletét, akik a CERN-ben is rendszeresen dolgoznak. A laboratóriumban különféle detektorokat, azaz mikrorészecskék észlelését végző berendezéseket terveznek és építenek a kutatók. A közös munka során a diákok terveznek, sőt maguk is összeállítanak egyszerűbb mérőeszközöket, illetve ezek kipróbálására részecskefizikai tesztméréseket hajtanak végre. Így kerülnek pillanatról-pillanatra közelebb a mikrovilág rejtelmeihez, és modern eszközök segítségével ismerkednek az elemi részecskék fizikájával.

Az itt folyó munkát fogom bemutatni, hangsúlyozva azt a tényt, hogy a részecskefizikát tantermi körülmények között nem lehet eredményesen tanítani. A diákok által készített és elvégzett kísérletek sokkal nagyobb érdeklődésre tartanak számot, mint pusztán egy elméleti oktatás.

A mikrorészecskék fizikájával csak fakultáción vagy szakkörön tudunk részletesebben foglalkozni. Hogy ez a többség tanulmányaiból se maradjon ki, a tanítási órán a fizika szinte minden témakörébe ügyesen be lehet csempészni. A kinematikán belül, amikor nevezetes sebességekről beszélünk, megemlíthetjük az LHC-ben közel fénysebességgel utazó protoncsoomagokat, hőtannál is beszélhetünk a Nagy Hadronütköztetőről, az Univerzum legmelegebb és leghidegebb pontjáról. Elektromosságban az óriás szupravezető mágneseket, modern fizikában a részecskék által kibocsátott radioaktív sugárzást hozhatjuk fel példaként.

1. ábra. Az első utunk 2010-ben.





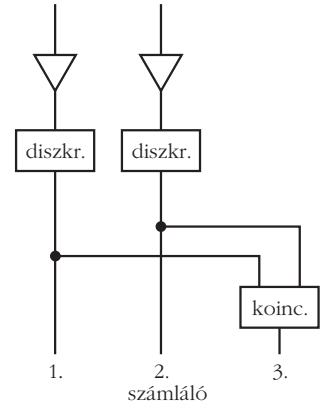
2. ábra. A szerencsés csapat.

A Mechatronikai Szakközépiskolában, ahol tanítok, a diákok motiváltsága nem tekinthető átlag fölöttinek. Bármilyen kisebb siker elérésének érdekében nagy munkát kell befektetni, hiszen a többség nehéznek tartja a tantárgyat, előítélettel viseltetnek irányában. Mindent be kell vetnünk ahhoz, hogy felkeltsük érdeklődésüket akár a részecskefizika legújabb eredményei iránt is.

2009-ben részt vettem a magyar fizikatanárok számára a CERN-ben rendezett továbbképzésen, ami meghatározó élmény volt számomra. Ekkor köteleztem el magam, hogy a részecskefizika rejtelmait a diákokkal is megismertessem. Az egyhetes út hatására a következő tanévben 22 tanulóval (1. ábra), 2013-ban pedig már 50 fővel tettünk több napos látogatást a híres kutatóközpontban. Az akkori kiránduláson ráadásul még az LHC egyik detektorához, a Kompakt Műon Szolenoidhoz (CMS) is lejutottunk, ami mindannyiunknak maradandó élményt jelentett.

Iskolámban hét tanuló jár emelt szintű fizikaképzésre. Ők abban a szerencsében részesültek, hogy az elmúlt tanévben heti rendszerességgel járhattak a Wigner Fizikai Kutatóközpontba, ahol részt vehettek a Nagyenergiás Fizikai Osztály Detektorfizikai laboratóriumában végzett kutatómunkában (2. ábra). Mindkét témavezetőm, Horváth Dezső és Varga Dezső ott dolgozik, és mint doktoranduszuknak biztosítani tudták a kutatás alapú oktatásban való gyakorlat megszerzését.

A hét fiú egyszerre nem tudott a laborban dolgozni, ezért két csoportra osztottuk őket. Az első néhány alkalommal Horváth Dezső és Varga Dezső tartott nekik bevezető jellegű előadásokat a részecskefizikáról, a detektorlaborban folyó munkáról és a detektorok működési elvéről. Elsőre kissé megijedtek a hallottaktól a fiatalok, de a végeredmény bizonyította, hogy képesek voltak hasznos feladatokat ellátni. A több



3. ábra. Az elektronszórást vizsgáló mérés összeállítása.

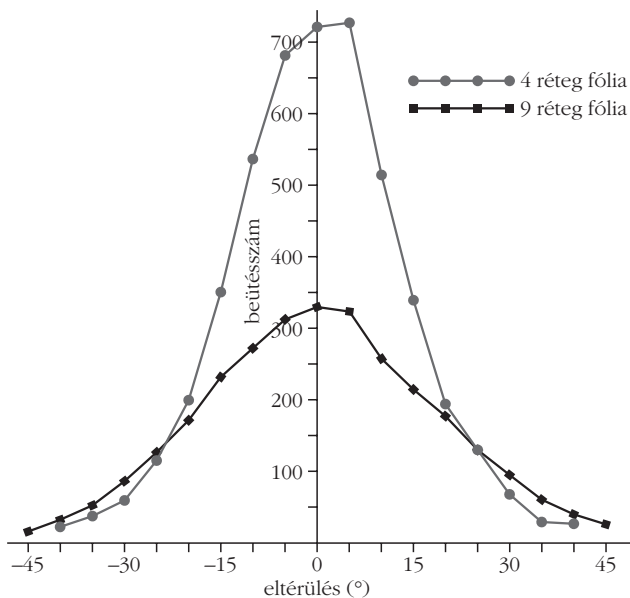
hónapig tartó munka során észrevétlenül sajátították el a modern fizika és azon belül is a részecskefizika bizonyos módszereit. Minden alkalommal örömmel érkeztek a laboratóriumba, soha nem kellett noszogatni őket, és nem törődtek azzal, hogy a hivatalos tanórai időtartam már rég lejárt, sokszor estig maradtak, hogy az elkezdett méréseket befejezhessék.

A kutatási feladat megfogalmazása a diákokkal közösen történt, ez is motiválta őket. Az egyik csoport többszörös szórási kísérleteket végzett saját maguk által összeállított kísérleti eszközzel. Különböző fóliákat teszteltek béta-sugárforrásból származó részecskék segítségével. Ez időigényes, gondos beállítást követelő feladat. A mérési eredmények segítségével a diákok ellenőrizni tudták a szakirodalomban található értékeket a konkrét detektoranyagokra. A mérés alapelve az, hogy meghatározzuk a béta-sugárforrásból kijövő olyan elektronok számát, amelyek egy fólián áthaladva az egyenes repülés pályájától adott szöggel eltérnek. Az elektron pályáját néhány milliméter átmérőjű lyukakkal (kollimátorokkal) irányítjuk. A mérés során a szóródási szög meghatározása mellett a diákok lejegyezték a keletkező részecskék számát a szcintillátorokban történő beütések száma alapján.

A 3. ábrán láthatjuk a mérés összeállítását, amelynek jobb alsó sarkában a henger alakú tárgy a béta-sugárforrás, a szürke dobozban pedig két szcintillátor található. A sugárforrás olyan kialakítású, hogy az már meghatározza a beérkező sugárzás irányát (a forrást tartalmazó tok maga egy kollimátor). A mérendő fólia

4. ábra. Életképek a laborból.

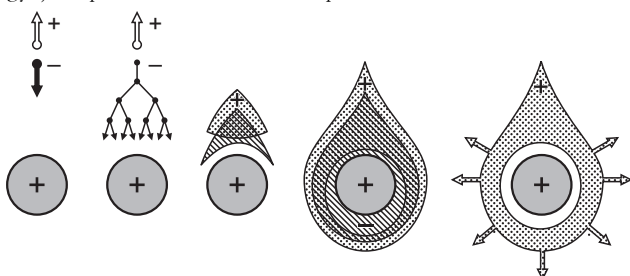




5. ábra. A tanulók által készített grafikon a 4, illetve 9 rétegben hajtogatott, 25 μm vastag alumíniumfólián szóródott elektronok mért beütésszámáról az eltérülés szögének függvényében.

vagy lemez a forrás tokjára van rögzítve. Az áthaladó elektron irányát egy bronzlemezbe fúrt 2 mm-es lyuk rögzíti. Ez utóbbi a szcintillátorok előtti háromszög alakú lemez. A szcintillátorok jeleinek vázlatos logikai rajzát a diákok készítették: a szcintillációs számlálók-ból először a két erősítőbe mennek a jelek, majd egy-egy zajsűrítő diszkriminátorba. Az elektron beérkezését a két szcintillátor egyidejű, azaz koincidenzában történő megszólalása mutatta. A mérés előtt beállításokat végeztek a diákok, majd kiosztották egymás között a feladatokat. Eldöntötték, ki fogja a szöget változtatni, ki olvassa le a beütések számát és ki jegyzi le az adatokat (4. ábra). Egyikük számítógépen is rögzítette az eredményeket, és standard számítógépes programokkal megrajzolták a keresett görbét. Az eredmények láthatóan mutatták, milyen kapcsolat van a fóliák anyaga és a görbe szélessége, magassága között. A pontos képlet helyett első körben számukra csak az volt a fontos, hogy lássák, a fóliák vastagságát növelve a görbe alacsonyabb és szélesebb lett, azaz jobban szétszórta az elektronokat.

6. ábra. Az elektronlavina létrejötte. A töltött részecske a gáztöltésű kamrában elektron-ion párt kelt. Az elsődleges elektron gyorsulva repül az anód felé, a szál közelében megnövekedett térerősség hatására a nagy sebességű elektron lavinaszerűen újabb elektron-ion párokat kelt. A csepp alakú lavina körbeöleli az anódot, amelyből az az elektronokat igen rövid, nanoszekundum körüli idő alatt begyűjti. A pozitív ionfelhő ehhez képest lassan távozik a katód felé.



Az egyik konkrét eredmény – a szög függvényében az alumíniumfólián áthaladó és szóródott elektronok száma – a diákok által készített 5. ábrán látható. A szürke vonal 4 réteg 25 μm vastag alumíniumfólia, a fekete pedig az ugyanebből az anyagból összeállított, 9 réteggel végzett mérés görbéje. A két grafikont összehasonlítva, jól látszik, hogy a haranggörbe magassága csökkent, szélessége pedig nőtt. Elméletileg azt várjuk, hogy a két görbe magasságaránya 9:4, félérték-szélességük aránya pedig 3:2 legyen. Ezt a mérések megerősítették.

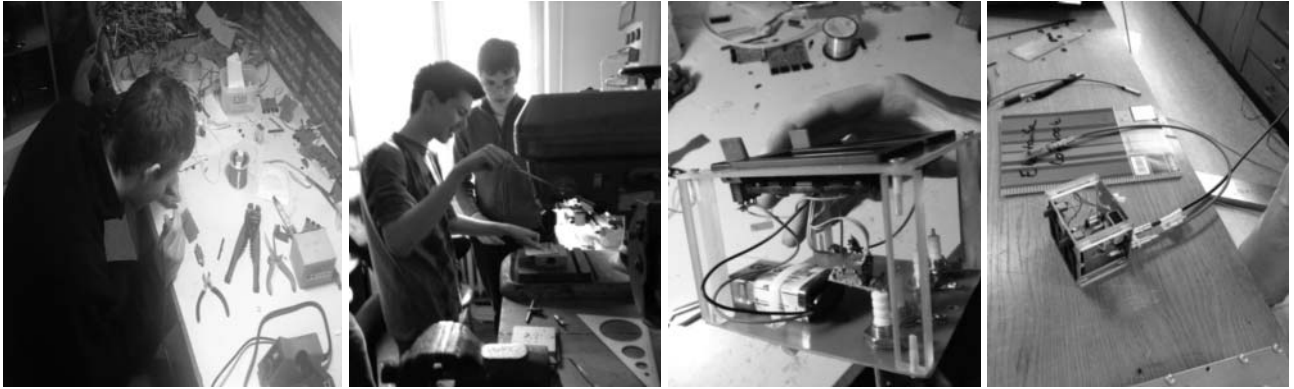
A laboratóriumban végzett munkánk során megtanultuk, hogy a detektorrendszerek működésének folyamatos ellenőrzéséhez kiegészítő, monitorozó berendezésekre is szükség van. Az LHC óriási „digitális kamerái” sokkal nagyobbak, mint amilyenekkel itt találkoztunk, és ha ezek meghibásodnak, költséges és nagyon bonyolult a szétszerelésük. A folyamatos adatszolgáltatás érdekében viszont a cél az, hogy minél hosszabb időn keresztül, fennakadás nélkül tudjanak működni, a meghibásodásra utaló jeleket pedig időben észrevehessék.

Ilyen jellegű problémával volt kapcsolatos a másik csoport munkája. Ők azt a feladatot kapták, hogy olyan árammérő műszert tervezzenek és építsenek, amely több kV-os feszültség mellett nanoamper nagyságrendben képes több detektor áramát mérni. Az ehhez szükséges elméleti háttérrel ismerkedve a diákok megértették a gáztöltésű kamrák működési alapelveit. Egy proporcionális számlálóban a mérendő ionizáló (töltött) részecske elektron-ion párokat hoz létre, az elektronok a pozitív töltésű vékony anódszál felé vándorolnak. A szál közelében nagy az elektromos térerősség, emiatt elektronlavina alakul ki: a gyorsuló elektron újabb elektront kelt, majd minden egyes lépésben megduplázódik az elektronok száma, exponenciálisan növekedve akár százezerszeres méretre (6. ábra).

Ha folyamatosan lavinák keletkeznek, az időben átlagos töltésáramlást, azaz áramot jelent. Az áram értéke tipikusan kicsi, nA alatti. Hibásan működő detektornál – például szennyeződés hatására – koronakisülések keletkeznek, ami növeli az áramot. Az áram nagyon pontos mérésével tehát a detektor helyes működését ellenőrizhetjük.

A diákok második csoportja egy ilyen, a detektorok áramát mérő eszköz megépítésével foglalkozott. Az általuk készített kapcsolási rajz segítségével kezdtek neki a mérőműszer megtervezésének, próbapanelen állapították meg, hogy miként tudják elhelyezni az elektronikai alkatrészeket.

A csapat egy része az ampermérő elektronikai részével foglalkozott. Az iskolában szerencsére már gyakorlatot szereztek, emiatt nem volt ismeretlen számukra a forrasztópáka használata, vagy az ellenállások színkódja. Rutinosan bántak a csípőfogóval, blankoló fogóval és egyéb szerszámokkal. Két fiú a mérőműszer dobozát állította össze. A 7. ábra második képén egyikük éppen a műszer alsó lemezén fúr adott nagyságú lyukakat a nagyfeszültségű csatlako-



7. ábra. A detektoráramokat mérő műszer készítése.

nagyságú lyukakat a nagyfeszültségű csatlakozók számára. Beszerelték a négy, műanyag tartóoszlopot, ami a doboz formáját adta meg, a digitális kijelzőket, és végül beforrasztották a nyomtatott áramköröket is.

Már csak a műszer kalibrálása volt hátra, amelynek eredményével a gyakorlott kutatók is meg voltak elégedve.

A résztvevők a tanév során mindkét projektet sikeresen lezárták, de a diákok annyira megszerették ezt a fajta tanulást-kutatást, hogy még a nyári szünetükből is hajlandók voltak pár hetet erre áldozni. Augusztusban már önálló szervezéssel mentek fel dolgozni a Wigner Fizikai Kutató Központba, ahol az ott dolgozók akkor is, mint ahogyan egész évben, nagy tudással és türelemmel foglalkoztak a jövő „kutatóival”. Az iskolai tanórákon is látom az elmúlt tanévben végzett munka kedvező hatását, azóta ezek a diákok sokkal tudatosabban készülnek a továbbtanulásra, és belát-

ják, hogy ehhez nélkülözhetetlen a fizika egyes ágain belül az elméleti tudás megszerzése. Ebben a tanévben egy középiskolában összeállítható és működtethető, kozmikus részecskéket detektáló eszköz kifejlesztése a cél.

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőim kívül *Hamar Gergőnek*, és a REGARD detektorfejlesztő kutatócsoport további tagjainak, akik áldozatos munkájukkal segítenek abban, hogy az érdeklődő tanulók számára egy másfajta tanulási módszert is kifejleszthessek.

Irodalom

1. Géczi János: Sajtó, kép, neveléstörténet. *Iskolakultúra-könyvek* 38 (2010) Gondolat kiadó, Budapest, 220 old.
2. <http://hu.wikipedia.org/wiki/Geiger%E2%80%933M%C3%BCller-sz%C3%A1ml%C3%A1l%C3%B3>
3. <http://itirex.wordpress.com/2011/07/07/gaztoltesu-detektorok/>
4. gluon.particle.kth.se/TEACHING/laboratory/xray/xray_instr.html

FELHŐK MAGASSÁGÁNAK MÉRÉSE

Stonawski Tamás
Nyíregyházi Főiskola

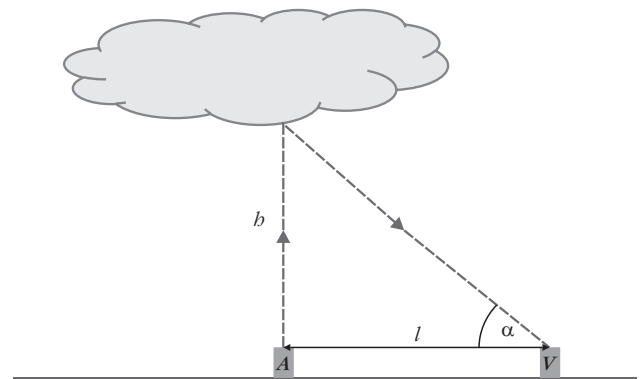
Hosszú megfigyelések eredményeként jött létre a Nemzetközi felhőatlasz, amely 10 felhőfajt, 14 felhőtípust, 9 altípust, 9 járulékos alakzatot és ezek lehetséges variációit adja meg. A felhőatlasz a felhők jellemző paramétereit tartalmazza, többek között a földfelszíntől mért magasságukat is. A magasságértékek igen sok műszeres mérésből adódnak össze, így a légkört meghatározó mennyiségek változásai miatt a táblázatokban nem egy-egy konkrét magasságértéket találunk, hanem egy széles intervallumot átfogó értékssereggel jellemezhetjük a kiválasztott felhőfajok talajszinttől mért magasságát.

A magasságmérés elvégezhető ballonnal, radar-technikával és lézerrel is. A ballon által felvitt pszichrométer alapján meghatározható a harmatpont magassága, ami a felhőalap magasságával egyezik meg.

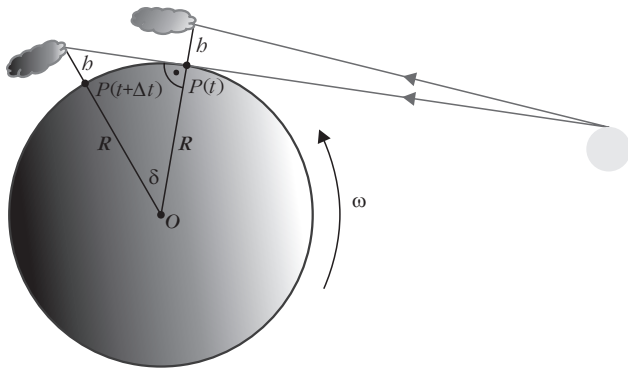
Az elektromágneses hullámokkal történő mérés lényege, hogy egy függőleges hullámmal visszave-

rődését érzékelik egy ismert távolságból (1. ábra). A detektor állásából meghatározható a magassági szög, amely alapján a felhőmagasság már kiszámítható [1].

1. ábra. Az A adóból induló hullámokat a felhőről visszaverődve a V vevő detektálja. A detektor adataiból meghatározható a felhőalap magassága: $b = l \tan \alpha$.



Köszönet *Jubász Andrásnak* és *Jánosi Imrénének* a segítségükért.



2. ábra. A naplemente után még egy ideig megvilágítja a Nap a felettünk lévő felhőket.

Az általunk megfigyelt felhők magasságát – drága mérőeszközök hiányában – meghatározhatjuk az alábbi eljárással [2].

A naplemente után még egy ideig megvilágítja a Nap a felhőket (2. ábra). Ez abból adódik, hogy a felhők magasabban helyezkednek el (b), mint a P pontban lévő földi megfigyelő. A felettünk lévő felhők magasságának sikeres megméréséhez a horizont felett tiszta égboltnak kell lennie. Figyeljük meg a naplementét, majd amikor a Nap alábukik a horizonton, indítsuk el az előkészített stoppert és mérjük meg, hogy mennyi idő alatt tűnik el a fény a felettünk lévő felhőről! A kérdéses Δt – esetünkben 429,6 s – idő alatt a Föld δ szöggel fordul el a saját tengelye körül, a $P(t)$ pont a $P(t+\Delta t)$ pontba kerül. A δ szöget – a Föld teljes körbefordulásához szükséges 24 óra = 86 400 s ismeretében – egyszerű egyenes arányosság alapján számíthatjuk ki:

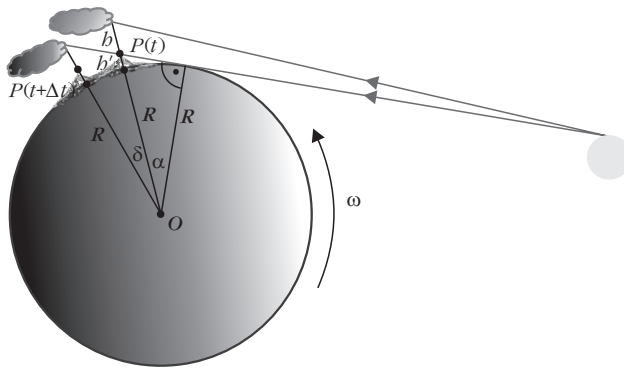
$$\delta = \frac{\Delta t}{86\,400} 2\pi.$$

Majd a 2. ábrán látható derékszögű háromszög alapján – a Föld $R = 6,37 \cdot 10^6$ m sugarának ismeretében – kifejezhetjük a felhő b magasságát:

$$\begin{aligned} \cos \delta &= \frac{R}{R+b} \rightarrow \\ b &= \frac{R}{\cos \delta} - R = \frac{R}{\cos\left(2\pi \frac{\Delta t}{86\,400}\right)} - R = \\ &= \frac{6,37 \cdot 10^6}{\cos\left(2\pi \frac{429,6}{86\,400}\right)} - 6,37 \cdot 10^6 \approx 3100 \text{ m} \end{aligned}$$

A mérés sikeres kivitelezéséhez mindenekelőtt olyan helyszínt kell keresni, ahonnan jól látható a horizont és nincsenek a látványt takaró tereptárgyak. A másik fontos feltétel, hogy a horizont felett csak kevés felhő legyen, hiszen a lemenő Nap utolsó sugarainak el kellett jutniuk először a megfigyelőhöz, majd napnyugta után a felettünk lévő felhőkre, és azokon visszaverődve a megfigyelő szemébe.

Mi erre alkalmas helyszínt a Nyíregyházi Főiskola 6. emeletén találtunk, és csak a sokadik megfigyelés alkalmával sikerült kedvező körülményekben a mérést végrehajtani.



3. ábra. Ha a mérést a tengerszint fölött végezzük, módosul a 2. ábra. A felhő magasságának meghatározásához az ábra két derékszögű háromszögének összefüggéseit használtuk fel, b' a mérési helyszín tengerszint feletti magasságát jelöli.

Ötletek a pontosabb magasságméréshez

A mérések közben a diákokban sok ötlet fogalmazódott meg a számítások pontosítására. A két legfontosabb felvetés szerint meg kell vizsgálni a szélességi fok és a tengerszint feletti magasság befolyását a mérés végeredményére. A tengerszint feletti értékek a telepviszonyoknak megfelelően eltérőek lehetnek a Föld egy-egy pontján. A 2. ábrát ezért módosítani kellett (3. ábra).

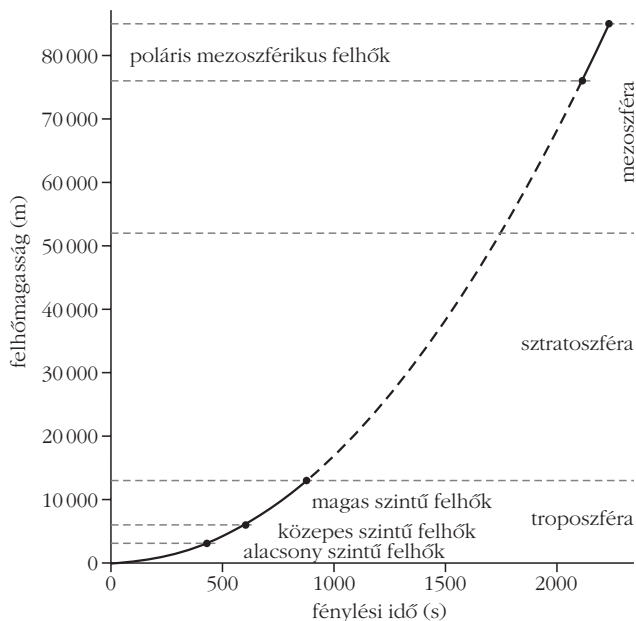
A 3. ábra derékszögű háromszögeiből az alábbi összefüggések írhatók fel:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{R}{R+b'}, \\ \cos(\alpha + \delta) &= \frac{R}{R+b'+b} \rightarrow \\ b &= \frac{R}{\cos(\alpha + \delta)} - (R+b'), \end{aligned}$$

ahol b' a megfigyelő tengerszint feletti magasságát, α pedig e magasság miatti, időben későbbi naplementéhez tartozó Föld-elfordulás szögét jelöli.

Ha figyelembe vesszük, hogy a Föld φ szélességi fokán a forgástengelytől mért R' távolság:

1. táblázat			
A felhőatlaz magasságértékeire kiszámított fénylési idők az Egyenlítőn és Nyíregyházán			
felhőtípus	előfordulási magasság (km)	észlelési idő napnyugta után (min)	
		$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 48^\circ$
éjszakai világító felhők	76–85	35–37	43–45
magas szintű felhők	6–13	10–15	12–18
közepes szintű felhők	2–6	6–10	7–12
alacsony szintű felhők	0–2	0–6	0–7



4. ábra. A felhők tengerszinttől mért magassága a fénylési idő függvényében, amikor a megfigyelő az Egyenlítőn és a tengerszinten van. A tiltott sáv szaggatott vonallal van jelölve.

$$R' = R \cos \varphi,$$

és ezt helyettesítjük a b felhőmagasságot megadó képletbe, a következő függvényt kapjuk:

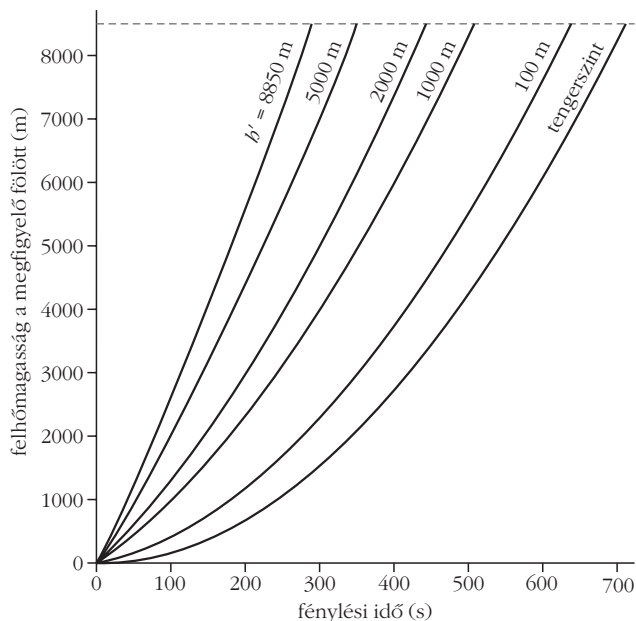
$$b(\Delta t) = \frac{R \cos \varphi}{\cos \left(\arccos \frac{R \cos \varphi}{R \cos \varphi + b'} + 2\pi \frac{\Delta t}{86\,400} \right) - (R \cos \varphi + b')}.$$

Az értelmezési tartományok és az értékkészletek meghatározásához a felhőatlasz adatait is felhasználtuk (1. táblázat). A felhők csoportosításánál (1. táblázat és 4. ábra) látható, hogy létezik egy tiltott sáv (13–76 km) – ez a sztratoszféra, itt csak nagyon speciális körülmények között, főleg a sarkvidékeken jöhetnek létre felhők –, ahol a „hagyományos” felhők már nem fordulhatnak elő, de e fölött, a mezoszférában poláris mezoszférikus felhők figyelhetők meg. Az 1. táblázat alapján jól látható, hogy azonos magasságban úszó felhőt magasabb szélességi fokról megfigyelve az hosszabb ideig fénylik a sötétben.

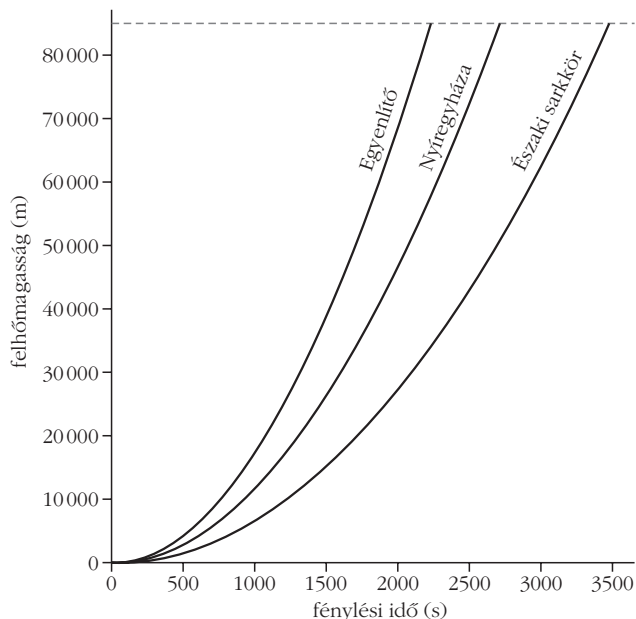
A mérési helyszín tengerszint feletti magassága is jelentősen befolyásolhatja a számításokat, mint az 5. ábra mutatja. A szélességi fokok hatása a mérésre még nagyobb: akár 60%-os eltérés lehet ugyanazon magasságú felhő fénylési ideje között az északi sarkkörön, illetve az egyenlítőn (6. ábra).

Tereptárgyak fénylése

A felhők fénylése lenyűgöző látványt nyújt az esti és a hajnali égbolton. Magasabb tereptárgyak, tornyok, hegyek is képesek fényleni a sötétben, igaz sokkal



5. ábra. A felhők megfigyelőhöz képesti magassága az Egyenlítőn a fénylési idő függvényében a megfigyelő tengerszint feletti magassága, mint paraméter változtatásával.



6. ábra. A felhők tengerszinttől mért magassága a fénylési idő függvényében a szélességi fok, mint paraméter változtatásával. A tiltott sáv nincs jelölve.

kevesebb ideig – pár másodperctől néhány percig –, mint ahogy azt a felhők esetében láttuk (7. ábra).

Az ókori Egyiptom obeliszkjei és nagyszabású piramisai is lélegzetelállító látványt nyújthattak napkelte előtt és naplemente után, amikor a fényesre csiszolt köveken (amelyek mára már szinte teljesen eltűntek, hiszen évezredek át szolgálták a környék építőanyagául) visszaverődtek a sötét tájba a Nap sugarai. Az obeliszkbe a Napistenhez szóló imákat véstek, csúcsait pedig jó fényvisszaverő képességű, sima felületű fémmel, legtöbbször arannyal vonták be. Ezek a tények arra utalnak, hogy a 10-30 méteres monoliti-

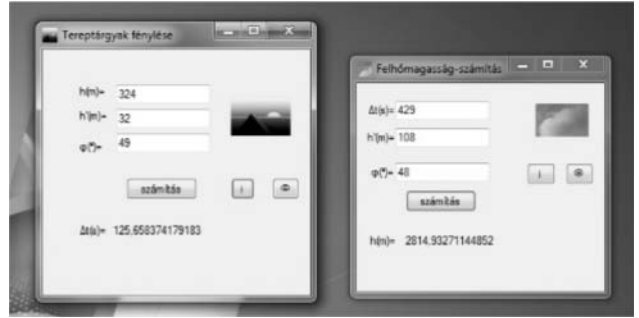
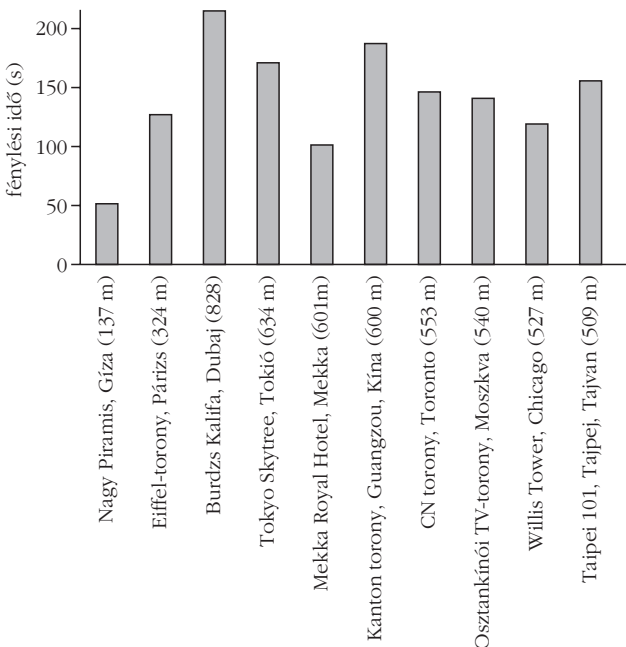


7. ábra. A sík sivatagi környezetéből 348 m magasan kiemelkedő Uluru/Ayers Rock Ausztráliában. A magányos homokkő sziklatömb környezete naplementekor már sötétben van, ő maga pedig a csúcsa felé közeledve – vörösből narancsba hajló – egyre világosabb (fotó: Hajjas János, www.panoramio.com/user/hajjas).

kus építmények a napkelte első sugarainak láttatására is szolgáltak [3]. (Az egyiptomi túlvilági hit szerint a lélek halhatatlan és képes vándorolni. A piramisok mélyén elhelyezett balzsamozással konzervált testeket a hit szerint a lélek újra birtokba veheti. A hajnalban és alkonyatkor fénylő piramisok a fáraó visszatérő lelkének testbe való költözését és annak elhagyását is szimbolizálhatta.)

Ha a $b(\Delta t)$ függvényből egy $\Delta t(b)$ függvényt készítünk, akkor e függvény segítségével meghatározhatjuk a magas épületek fénylési idejét. Az épületekhez fénylési időket csak akkor van értelme rendelni, ha – a piramisokhoz hasonlóan – szomszédos tereptárgyak nélkül magányosan állnak, ellenkező esetben a számolt értékeket a mérésekkel nem lehet összevetni.

9. ábra. Néhány magas épület fénylési ideje. A fénylési idő az épület magasságán kívül a tengerszint feletti magasságtól és a szélességi foktól is függ.



8. ábra. Információs felülettel ellátott C# nyelven írt programok segítették a számításokat.

A számítások hosszadalmasak, ezért C# nyelven rövid programokat írtunk [4] a b felhőmagasság és a tereptárgyak Δt fénylési idejének a kiszámításához (8. ábra).

A Google Earth, mint adatbázis [5] felhasználásával meghatároztuk néhány híres, magas épület fénylési idejét (9. ábra). A jelenlegi legmagasabb (828 m) felhőkarcoló, a Dubajban található Burdzs Kalifa itt is kiemelkedik a többi közül, a *címlapon* napkeltekor még sötét környezetéből világlik ki a már napsütötte épület (a jó kontraszt az Egyenlítő közelségének is köszönhető). Az Eiffel-torony – kedvező elhelyezkedése miatt – magasságához képest viszonylag nagy fénylési időt mutat.

Konklúzió

Az időmérés alatt a Föld forgása mellett természetesen a felhő is mozgott és a Föld is a Nap körüli ellipszispályáján keringett, de méréseink során ezeket a mozgásokat elhanyagoltuk. A mérés legnagyobb pontatlansága a kezdő és a befejező időpont meghatározásában rejlett.

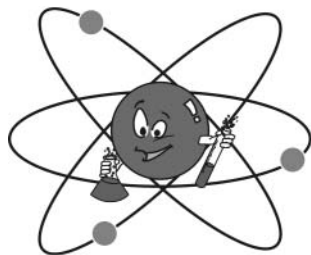
A pontatlanság ellenére igen hasznosnak találok a mérés elvégzését, hiszen általánosan közelít meg egy, a Földhöz kapcsolódó speciális mozgást. Azok a fizikai tények, hogy a Föld forog (és vajon mennyire követi a légkör a földfelszínt), a felhők kis szakaszon vizsgálva tényleg egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznek-e, milyen adatok szükségesek a felhők sebességének a méréshez, melyek a mérést befolyásoló és melyek az elhanyagolható körülmények; mindezen felismerések a tanulókat egyfajta komplex gondolkodásra kényszerítették, hiszen a fizikakönyvek feladatai csak speciálisan kiélezett és egy adott témakörhöz kapcsolódó problémákkal foglalkoznak. A fenti összetett mérés pedig a maga általánosságával közelebb hozta a fizikaórát a mindennapok történéseihez.

Irodalom

1. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/meteorologia/ch05s04.html>
2. <http://justtechnika.com/articles/find-height-of-clouds-with-a-stop-watch/>
3. <http://hu.wikipedia.org/wiki/Obeliszk>
4. <https://onedrive.live.com/?cid=F268C03064AF1E7D&id=F268C03064AF1E7D!159>
5. <http://www.google.hu/intl/hu/earth/download/ge/agree.html>

Tudományok fesztiválja Aradon

Iskolánk diákjaival már több éve részt veszünk e rendezvényen, amelynek minden évben az Aurel Vlaicu Általános Iskola ad otthont. A fesztiválról az aradi magyar nyelvű napilap, a *Nyugati Jelen* is rendszeresen tudósít:



„Holnap délelőtt zajlik az Aurel Vlaicu Általános Iskolában a megyei tanfelügyelőség által évente megszervezett Tudományok fesztiválja.

A hivatalos megnyitó 10 órakor kezdődik az iskola tornatermében, ezt követően az érdeklődők 41 standon követhetik a különböző fizikai, biológiai, kémiai kísérleteket, bemutatókat.

A Tudományok fesztiválján a két aradi egyetem – Vasile Goldiş és Aurel Vlaicu – is képviselteti magát, de jelen lesz Temesvárról a Nyugati Egyetem Fizika Kara, a Politechnika Egyetem Mechanika és Elektrotechnika Kara, valamint a kolozsvári Babeş–Bolyai Tudományegyetem és a kolozsvári Tiberiu Popovici Informatikai Líceum.

Az esemény magyarországi meghívottja a Csongrád megyei Üllésről a Fontos Sándor Általános Iskola, de a felsoroltakon kívül jelen lesznek diákok még 31 aradi és Arad megyei iskolából.

A tanintézményeket leszámítva két pedagógiai eszközöket gyártó aradi cégnek is lesz standja az Aurel Vlaicu Általános Iskola tornatermében.”¹

Először 2011-ben kaptunk meghívást a fesztiválra, *Pattus Illés* tanár úr, a rendezvény főszervezője keresett meg bennünket *Kopasz Kata* tanárnő javaslatára. Öt diák és három kísérő tanár ment el a rendezvényre, amely felejthetetlen élmény volt mindannyiunknak. Sok új ötletes kísérlettel a birtokunkban tértünk haza.

A következő években iskolánk ismét meghívást kapott e jeles eseményre, amelyen főleg román iskolák vettek részt, emiatt mi tolmácsokat kaptunk. Két helyi 8. osztályos diák segített a kísérletek bemutatása közbeni magyarázatok fordításában.

Összesen 43 iskola mutatkozott be az aradi iskola tornatermében. Volt olyan időszak, amikor közel 1000 ember volt a tornateremben. Minden iskola egy asztalt kapott, ahol elhelyezhette kísérleti eszközeit és reklámanyagokat iskolájáról.

Bemutatott kísérleteink közül a legsikeresebbek (névsorban) a következők voltak: A virág, amely kinyílik a vízben; Éghetetlen papír; Elektromos bogarak;

Elektromotor; Fekete kígyó; Füstbomba; Habgép; Habzó szörnyek; Idegállapot-mérő; Kémikus kiskertje; Pokolgép; Rettenetes lila emberevő; Szendvicsduda; Színezett zsebkendők; Tengervíz, folyami víz; Tűztornádó; Vulkán; Xilofon papírhengerekből.

A tűztornádót szinte minden érdeklődő csoport érkezésekor bemutattuk, óriási sikert aratott. A pokolgép „robbanása” meglepte a diákokat, rögtön készíteni is szerettek volna egyet, aminek természetesen semmi akadálya sem volt.

Majd „hangszer”-bemutatót tartottunk: xilofont papírhengerekből, szendvicsdudát spatulákból és szívószálsípót, természetesen szívószálsípból. A szendvicsdudát, szívószálsípót szintén bárki elkészíthette, majd a rögtönzött „hangversenyt” követően el is vihették az érdeklődők.

Kísérleteink nagy sikert arattak, a rendezvény végig sok érdeklődő fordult meg asztalunknál.

A *Nyugati Jelen* így írt a fesztiválról, benne iskolánkról:

„Kutatóintézeté változott pénteken délelőtt az Aurel Vlaicu Általános Iskola tornaterme a hetedik alkalommal megrendezett *Tudományok fesztiválja* alkalmából.

Apró kis vulkánok, feszültségmérők, színes, bugyogó folyadékok, szikrázó fénysugarak, füstölgő kémcsövek, mikroszkópok és sok más látványos eszköz között tüsténkedett több száz diák az aradi Aurel Vlaicu Általános Iskolában VII. alkalommal sorra kerülő, a megyei tanfelügyelőség által évente megszervezett Tudományok Fesztiválján.”²

„Az egyre nagyobb népszerűségnek örvendő eseményen Arad, Temes, Kolozs megye középiskolái, illetve egyetemei képviseltettek, de a standoknál találkozunk magyarországi, sőt egy ciprusi diákcsoporttal is.

Két asztallal arrább egy magyarországi csapat csalogatta a látogatókat látványos szemléltető eszközeivel. Az üllési Fontos Sándor Általános Iskola (Szegedtől 26 km-re) hat hetedikes, illetve nyolcadik osztályos diákjait

Iskolánk bemutatkozó posztere.



¹ Takáts D. Ágnes: Tudományok fesztiválja 41 standdal! *Nyugati Jelen* 2013. november 7.

² Takáts D. Ágnes: Kis helyen a Tudományok fesztiválja. *Nyugati Jelen* 2013. november 9.

Tasi Zoltánné és Kocsisné Hecskó Ágnes pedagógusok kísérték el. Mint elmondták, szemléltető kísérleti eszközeik zömét a gyerekek (olykor szüleik segítségével) saját kézzel készítették el a tanórákon kívüli foglalkozásokon, így a tananyag elsajátítása, a jelenségek megértése is könnyebben ment. A fantáziát és kez ügyességet fejlesztő Leonardo-hídja, a gőzforgó vagy a pillepalackból készült rakétakilövő állomás bizony sok kíváncsi szemet odavonzott standjukhoz.³

Mindenkinek figyelmébe ajánlom ezt a fesztivált,⁴ hiszen óriási élmény tanárként és diákként is részt venni egy ilyen rangos eseményen.

Játsszunk fizikát Erdélyben!

Tanítványaimnak sok lehetőséget igyekszem teremteni arra, hogy a fizikával ne csak a tanórák keretében ismerkedjenek. Az elmúlt tanévben a *Határtalanul!* program keretében nyert 5 napos kirándulásunknak a *Játsszunk fizikát Erdélyben!* címet adtuk.

A résztvevő 45 tanuló 9 csoportban dolgozott a kirándulás előkészítése közben, alatt és azt követően is.

Előzetes feladatok

- A tanulócsoporthoz önállóan készültek fel a kirándulás során érintett nevezetességek, híres emberek bemutatására. Irodalmi, történelmi, földrajzi, biológiai anyagokat gyűjtöttek, prezentációt készítettek, amelyeket az előkészítő foglalkozásokon bemutattak a többi résztvevőnek.

- A kirándulást megelőzően helyben is elvégeztük a Torricelli-kísérletet a gyerekekkel és egy lelkes apuka közreműködésével. Mivel falun 10 m-nél magasabb épület alig található, ezért a víztornyot választottuk a mérés helyeként. Itt 9 m 52 cm-nél állt meg a vízszint az átlátszó csőben. A másik magas épület a templomtorny, oda is ellátogattunk a gyerekekkel. A plébános vezetésével felmentünk a toronyhoz, de a kísérletet nem ismételhettük meg, mert a „toronyba mászást” balesetveszélyesnek ítéltük.

- A résztvevő diákok kísérleteket gyűjtöttek, a legsikeresebbet helyben kipróbálták és bemutatták osztálytársaiknak, majd összerendezték a hozzávaló eszközöket és a kiutazáshoz bedobozolták.

- Ajándékokat készítettünk a fogadó iskoláknak.

- Prezentációt állítottunk össze iskolánkról és Ülésről a bemutatóhoz.

Az erdélyi kirándulás

A fizika a kirándulás minden napján jelen volt. Fizikai témájú rajzos fejtörőket, rejtvényeket állítottunk össze, amelyeket a csoportok a kirándulás ideje alatt megoldottak, a helyes megfejtőket jutalmaztuk.

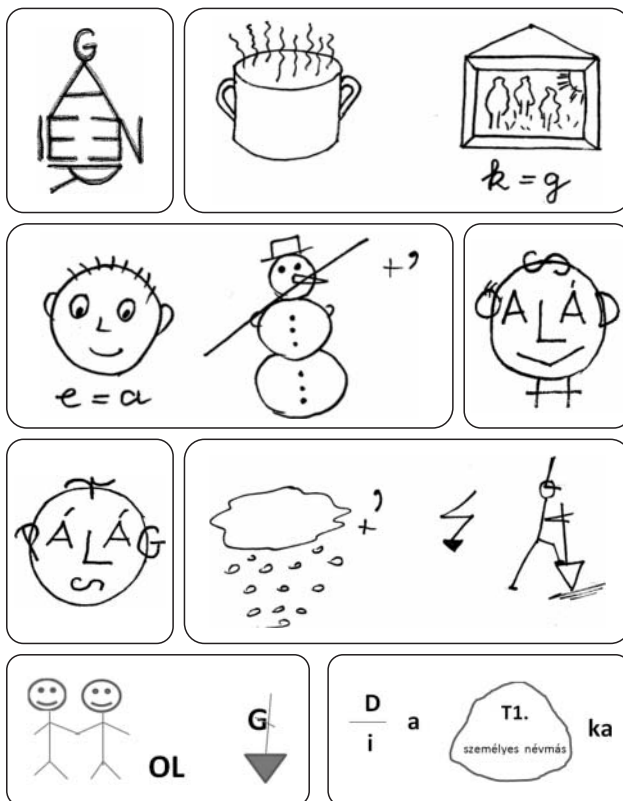


Bemutató Torockón.

Humoros rajzok készültek fizikusokról, fizikai jelenségekről. A legügyesebb művekből hazaérkezésünket követően kiállítást készítettünk.

Az első napon Aradon az Aurel Vlaicu Általános Iskola tornatermében tartottunk bemutatót az ottani 7. osztályosoknak. Ezt másnap a torockói iskolában megismételtük. Volt például egyszerű rakétakilövő, táncoló szőlőszemek, kólaszökökút, fekete kígyó, tűztornádó. Élvezettel nézték a helyiek a bemutatót, és akadt néhány bátor jelentkező, nekik a fejük tetején melegítettük a vízzel megtöltött lufit. A lufi természetesen „tudta a dolgát”, tehát mindenki szárazon megúszta a kalandot. A szünetben az osztályok kijöttek az udvarra, és közösen szurkoltunk a laptopok, hogy felemelkedjenek, ami – a nézők nagy öröme – sikerült.

Néhány érdekes kép- és betűrejtvény az internetről és könyvekből gyűjtött feladatok közül.



³Sólya R. Emília: Évről évre népszerűbb. *Nyugati Jelen* 2011. október 29.

⁴ Festivalul Științei Arad néven az interneten könnyen megtalálható.

A kísérleti bemutatót követően, egyik délután „Csínáld magad fizika!” alkotóházi foglalkozást szerveztünk a torockói diákoknak, ahol hangszerek készítése volt az egyik feladat. Így a résztvevők nagy örömeire ismét készült szendviczduda spatulából, síp szívószáלבól, xilofon papírhengerekből, valamint pohárzene. A diákok vízkereket, vízcsapot, italautomatát, rakétakilövő-állomást készítettek műanyag flakonokból. „Olajcserét végeztünk házilag.”

Torricelli-kísérlet

A Torricelli-kísérletet az aradi iskola tornatermének tetejéről Pattus Illés tanár úr közreműködésével végeztük el. Közel 10 m-es volt az a vízoszlop, amellyel a külső légnyomás egyensúlyt tartott, hasonló értéket kaptunk Torockón is.

Számítsuk ki a Föld méretét!

Napsütötte időben megismételtük Eratoszthenész mérését. A Nap delelésének pillanatában megmértük a méterrúd árnyékát Torockón és Üllésen is, majd hazaérkezésünk után elvégeztük a számítást.

Látnivalók

A kísérletezés mellett – természetesen – sok mindent láttunk Erdélyből is, így a Dévai várat, Gyulafehérvárt, Vajdahunyad várat. Meghódítottuk a Székelykővet, túráztunk a Tordai-hasadéokban és a Tordai-sóbányában. A Királyhágót, a kolozsvári és a nagyváradi sétát mind-mind emlékeinkben őrizzük.

eTwinning az iskolánkban

Iskolánk 2005 óta vesz részt az eTwinning projektekben.⁵ Egy ilyen program szinte mind a nyolc kulcskompetenciát fejleszt.

A projektek célja, hogy a résztvevő országok közoktatási intézményei nemzetközi, interkulturális környezetben, IKT eszközök segítségével, közösen dolgozzanak ki programokat szabadon választott témakörökben. Eközben

- a projektek munkanyelve angol, a kommunikációs kényszer motiválja a diákokat, és növekszik igényük az idegennyelv-tanulásra, fejlődik az idegen nyelvű kommunikációs készségük;
- tudatosan bennünk a környezetvédelem;



⁵ „Az eTwinning egy olyan keretrendszer, amely Európa különböző országaiiban található partneriskolák közös projektjeinek indítását, együttműködését segíti. A program a résztvevő európai közoktatási intézmények információs és kommunikációs technológiák (IKT) segítségével folytatott együttműködési tevékenységeit támogatja azáltal, hogy technikai, pedagógiai, módszertani segítséget, online eszközöket és szolgáltatásokat nyújt számukra.” (<http://www.educatio.hu/projektjeink/eTwinning>)

- hulladék anyagokat hasznosítanak újra a kísérleti eszközök készítésekor;
- a közös munka során az infokommunikációs eszközök használatát is elsajátítják, fejlődik a gyerekek digitális kompetenciája;
- jelentősen fejlődik a diákok természettudományos ismerete.

The Danube, Europe's blue ribbon (Duna, Európa kék szalagja); Water – the source of life (Víz – az élet forrása); Let's play physics (Játsszunk fizikát!) projektekben szintén megjelenik a fizika. E programok keretében vízzel kapcsolatos kísérleteket gyűjtöttünk és gyűjtöttek a partneriskolák is, majd a kiválasztottakat a közös felületen publikáltuk. A főbb lépések az alábbiak:

- kísérleti eszközök elkészítése;
- próbálgatás;
- jelenségek magyarázata;
- fotók, videók készítése a sikeres kísérletekről, publikálás. A rövid útmutatót minden résztvevő a munkanyelvre fordítva tette fel az eTwinning felületére.

Mindenki a másik iskola javasolt kísérleteit próbálta ki. Ha nem működött vagy finomításra szorult, akkor megbeszéltük e-mail, skype stb. segítségével.

Az eTwinningben végzett munka segített tapasztalatokat gyűjteni a tervezett (Comenius) Erasmus+ programok megvalósítására. Iskolánkban jelenleg egy kétéves Comenius-projekt első évét zárjuk.

Egy ilyen *nagy szabású programnak óriási közösségformáló ereje van*. Hiszen az egész tanári kar, a diákok és a lelkes szülők együtt dolgoznak a projekt feladatainak megvalósításán.

„Fizikátúra” a Soproni hegyekben

Erre a 2005-ben, a Fizika évében indult rendezvényre az elmúlt években többször is elutazhattunk.⁶ Három fős csapatokkal indulhattunk ezen a különleges versenyen, amelyről szintén óriási élményekkel tértek haza diákjaink. A részvétel az iskolavezetés megnyerését követően, már „csak” az anyagiakon múltott, hiszen Üllésről az utazás, a szállás és az étkezés olyan költséget jelentett a résztvevő tehetséges diákok szüleinek, amelyet nem mindegyik család tudott vállalni. Szerencsére az önkormányzat vállalta a szállítást, az iskola alapítványi keretből fizette a diákok szállását, saját költségen csak az étkezést kellett megoldani.

A verseny hazai esemény, de az akadálypálya egy-egy szakasza már Ausztria területén haladt. (Persze néha letévedtek a diákok a kijelölt útvonalról – meglátogatva a sógorokat –, ilyenkor *Lang Ágota* tanárnő „felmentő serege” segített megtalálni a helyes irányt.) Alföldi gyerekeknek ez a hegyi túra igen nagy erőpróbat jelent évről-évre.

⁶ Korábbi számunkban részletes beszámoló olvasható a Fizikátúráról. Lang Ágota, Czupy Judit: Fizikátúra – avagy hogyan mozgassuk meg diákjainkat fizikailag? *Fizikai Szemle* 57 (2007) 96–100.



A Részecskefizikai Diákműhely 2014 résztvevői.

Horváth Dezső és *Jancsó Gábor*, akik minden évben töretlen lelkesedéssel szervezik a diákműhelyt, elismerő szavakkal adták át két diákunknak is az oklevelet.

Összegzés

Régóta tudjuk, ha diákjaink csak a tanórákon ismerkednek a tananyaggal, akkor az iskola nem tudja a gyereket a felnőtt életre felkészíteni. Gyermekkorban pedig az iskola maga az élet, így meghatározó jelentőségű az iskolai légkör: mennyire gerjeszt szorongást, feszültséget, vagy éppen ellenkezőleg, mennyire képes oldani ezeket. Minden tantárgy esetében kívánatos, hogy minél több lehetőséget teremtsünk az ismeretek elsajátítására, megerősítésére.

A szombati versenyt követően volt, amikor még vasárnapra is maradtunk a tanítványainkkal. Reggel elutaztunk Fertőrákosra, hajózártunk a Fertő tavon, majd Nagycenken ebédeltünk, és hazaindulás előtt még megtekintettük a Széchenyi Mauzóleumot.

Egy társadalom későbbi mentálhigiénés állapota szempontjából fontos, hogy az iskola által közvetített tananyag minél jobban megfeleljen az életkori sajátosságoknak, adjon lehetőséget a személyiség sokoldalú fejlődésére és fejlesztésére. A túlzottan ismeretközpontú iskola a gyermekek tömegeibe kódolja a szorongást, hiszen a bonyolultabb képletek alkalmazására képtelen tanulók adott tantárgyba vetett bizalma egyre csökken, a feszültség nő bennük, végül feladják a túl nehéz tananyag elsajátítását. Ha sokféle tevékenységet igyekszünk felkínálni, akkor „szép szóval oktató, de játszani is engedő” iskolaként könnyebben megértetjük a diákjainkkal a bonyolultabb jelenségeket, és közben megtanítjuk a gyereket az életöröme, a munka és a pihenés harmóniájára. A tanórai munka mellett ezért van nagy jelentősége annak, hogy minél több lehetőséget teremtsünk a határon innen és túl!

A tanórai munka mellett ezért van nagy jelentősége annak, hogy minél több lehetőséget teremtsünk a határon innen és túl!

Kutató leszek egy napra!

Iskolánk diákjai – *Jancsó Gábornak* köszönhetően – ebben a tanévben először vehettek részt az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont *Részecskefizikai Diákműhely* rendezvényén 2014. április 3-án. A középiskolások között a foglalkozás egyedüli általános iskolás párosa *Barna Réka* és *Gyuris Imre* volt. Bár fizikailag nem léptük át az országhatárt, de virtuálisan, videokonferencia segítségével ellátogattunk a CERN-be. *Béni Noémi* és *Szillási Zoltán* fizikusok, közvetlenül a CERN-ből tartottak rövid tájékoztatást, majd válaszoltak az érdeklődő kérdésekre. A rendezvény zárásakor

Tanítsd meg diákjaidnak!

Töltsd le!

Nézzed meg!

Mutasd meg másoknak!

Hogyan érkezett a Curiosity a Marsra?

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keresd a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

Áttörés a kozmológiában Brookhavenben

A Brookhaven Nemzeti Laboratórium vezető szerepet játszik egy multi-gigapixeles kamera szenzorának fejlesztésében, amely a Large Synoptic Survey Telescope (LSST, Nagy Szinoptikus Kutató Teleszkóp), a Chilében épülő nagyberendezés fontos része lesz, és amely a tervek szerint képes lesz a teljes látható déli égbolt leképezésére. Az LSST által gyűjtött és a korábbi megfigyelések adatai alapján a kutatók meghatározhatják a sötét anyag természetét és a Világegyetemben való eloszlását – egy olyan titokzatos erőt, amely a Világegyetem gyorsuló tágulása mögött rejtezik.

A BOSS – Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (Barion Oszcilláció Spektroszkopikus Vizsgálat) – együttműködés keretében a brookhaveni kutatók a Sloan Digital Sky Survey teleszkóp által szolgáltatott terapixel felbontású éjszakaiégbolt-felvétel felhasználásával elkészítik az Univerzum háromdimenziós térképét. Ez a térkép, amely úgy készül, hogy megfigyeli a rendkívül távoli fényes vörös galaxisok és kvazárok által kibocsátott fényt, fel fogja gyorsítani a sötét energia felkutatását.

(<http://www.bnl.gov/science>)

Részecskeláz: a film, amely életre kelti a Higgs-bozont

Egy új dokumentumfilm, a *Részecskeláz* eléri a majdnem lehetetlent, érthetővé és izgalmassá teszi a *Nagy Hadronütköztető* (Large Hadron Collider, LHC) munkáját – még a tudománytól a leginkább irtózó néző számára is. *Mark Levinson*,¹ a film rendezője, először 2007-ben látogatta meg a CERN-t, a Nagy Hadronütköztető otthonát, majd 2012 júliusáig vissza-visszajárt, amikor a fizikusok egy csoportja befejezte a Higgs-bozon utáni két évtizedes vadászatot, és megtalálta a keresett részecskét.

A *Részecskeláz* fél tucat különböző karaktert követ – száz ország több mint tízezer kutatója közül –, akik a világ eddigi legnagyobb és legkölségesebb kísérletén dolgoztak. Bemutatja a kutatókat, ahogy elmélkednek, vitatkoznak és pingpongoznak.

– *Őn azt mondta, hogy a Részecskeláz nem tudományos dokumentumfilm, Akkor mi?*

– Én úgy gondolom, hogy az ember küzdelme a megértésért. Olyan filmet akartam csinálni, amely azoknak is tetszik, akik nem érdeklődnek a tudomány iránt, azonban rokonszenveznek ezzel az abszolút meglepő emberi vállalkozással. A Nagy Hadronütköztetőt nehéz lenne a költségek tekintetében megindokolni, de – bár

nincs szükségünk rá a túléléshez – olyan valami, ami emberivé és fontossá tesz bennünket.

– *Amikor elkezdte a forgatást, gondolta volna, hogy a CERN kutatói megtalálják a Higgs-részecskét?*

– Nem. Én biztosra vettem, hogy van valami Higgs vagy hasonló, de hogy megtalálják, amíg mi forgatunk? Nem gondoltam. Majdnem mindegyik fizikus azt mondta, hogy a Higgs-részecskét olyan nehéz megtalálni, hogy valószínűleg évekbe telik, míg az adatokat összegyűjtik. Valójában mindenki azt gondolta, hogy ha találnak is valamit, ami új részecske lehet, de nem a Higgs.

– *Úgy tűnik a fizika abból áll, hogy a számokkal teli monitort bámulják. Hogyan lehet ezt drámaivá tenni?*

– Szerencsére volt egy csomó természetes dráma. Nem kellett kitalálni, csak fel kellett ismerni és elfogadni, ahogyan történt. Én sok időt dolgoztam a képzelet világában, írtam forgatókönyveket, rendeztem filmeket korábban is, de ha én írtam volna, sem tudtam volna jobb munkát végezni a feszültségkeltés terén.

– *2008-ra gondol, amikor az LHC-t több mint egy évre becsukták a mágnesekkel való probléma miatt?*

– A baleset tíz nappal az után történt, hogy elkezdték a forgatást. Rögtön azt gondoltam: „Na, a filmnek annyi!” De azután felismertem, hogy hamarosan újra működni fog, az egész pedig egy nagyszerű drámai

¹ Az 59 éves Levinson az 1980-as évek óta hangmérnök – konkrétan sok *Anthony Minghella* filmben –, de előtte PhD fokozatot szerzett részecskefizikából.

kanyar. A baleset miatt nagy volt a feszültség, és az új indulást még izgalmasabbá tette, de ez olyan, mint a hegymásznál az izgalom, hogy mi történik a következőkben.

– *Mennyire volt fontos az Ön fizikusi háttere és tudása a film készítésében?*

– Azt hiszem, lényeges volt. Azt hiszem azonnal benne voltam a dolgokban, nem kellett utánanéznem. Bizonyos értelemben a fizika nem sokat változott azóta, hogy én a 80-as években kiszálltam, bár akkor még nem volt LHC. Szóval tudtam mi a helyzet, ismertem az embereket, ismertem az életüket és tudtam mi forog kockán.

– *A film központja az elméleti és kísérleti fizikusok közti furcsa dinamika. Meg tudja magyarázni?*

– A sztereotípa a magányos elméleti fizikus, aki egyedül ül a szobában, mint *Einstein*, időnként feláll és ír valamit a táblára. Nagyon matematikusak, absztrakt gondolkodásúak, bizonyos értelemben ők az elit. De szükségük van olyan emberekre, akik kísérleteket terveznek számukra, hogy legyen visszacsatolás és irányt mutassanak. A konfliktus gyakran a különböző idősorkálák miatt keletkezik. Az elméleti fizikus reggel felkel, kitoröl egy egyenletet és felír egy másikat. Ezalatt a kísérleti kutató már tíz éve dolgozik azon, hogy bebizonyítsa az éppen kidobott elméletet.

– *Több mint 500 óra anyagot vett fel – mit szölk a tudósok ahhoz, hogy állandóan a nyomukban volt?*

– Közülük sokan filmrajongók, és tetszett nekik hogy én filmcsináló vagyok. Azt gondolták, örültt vagyok, hogy ennyit forgatok, de állandóan jelen volt az izgalom, hogy hátha bemutatok valakit közülük például *Nicole Kidman*nek, vagy valaki másnak.

– *Milyen volt a CERN?*

Mark Levinson és Monica Dunford



– Nagyon hasonló egy egyetemhez. Valószínűleg sokkal több a biztonsági ember, mint az egyetemi kampuszokon, de ha az ember egyszer bejut, akkor szabadon mászkálhat, bár vannak bizonyos helyek – mint például a föld alatti helységek –, ahová nem lehet bemenni. A legtöbb épületben azonban csak nyitott irodákat láthatunk, és azután van egy első osztályú cafeteria francia séffel. Az igazán zajos hely, sokan ott találkoznak és fizikáról beszélnek, amíg káposztát vagy halfilét esznek. A francia sütemények valószínűleg jobbak, mint bármely egyetemenél, ahol voltam, és nagy a kávé-kultúra.

– *Szokatlan módon nincs narrátor ennél a dokumentumfilmnél. Miért?*

– Mi azt akartuk, hogy olyan legyen, mint egy dráma, egy karaktereken alapuló film. Ha azonban van egy mindentudó narrátor, akkor csupán „tudományos dokumentumfilm” lesz. Az elképzelés az volt, hogy minden természetes legyen és közben az ember ne vegye észre, hogy előadást tartanak neki. Inkább olyan legyen, mint egy személyes tanítás.

– *A filmben fantasztikus előadók vannak, különösen egy Monica Dunford nevű fizikus. Több száz emberrel kellett beszélnie, hogy a megfelelő embereket kiválassza?*

– Nem beszéltem több száz emberrel. Monica az első tucatban volt, akikkel beszéltem, és szerencsémre azonnal világos volt, hogy van benne valami különleges. Ez nem csupán tudomány: az emberek többsége nem szükségképpen érdekes, karizmatikus és артиkulált. Nem gondolom, hogy ezek különlegesek, de azt hiszem a néhány legjobbat megtaláltuk.

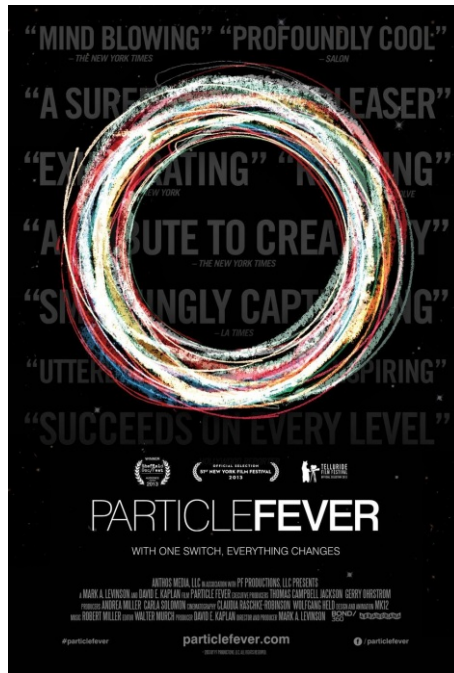
– *A nőknek kiemelkedő szerepük van a filmben. Ez a tapasztalata a CERN-nel kapcsolatban vagy általában a tudománnyal?*

– Nem, és igazából aggódtam, hogy túl sok lesz a nőből. De a legjobb karaktereket választottuk ki, és örülök, hogy végülis így alakult, mivel nyilvánvalóan a nők alulreprezentáltak. A kontroltermek felvételein látható, hogy vannak nők, de csupán talán 30%, ami igazán alacsony. Jó lenne, ha a film tudna ezen változtatni.

– *Most nagy a kereslet a népszerű tudomány iránt – tervezi, hogy ezen a területen folytatja?*

– Ez a téma elkényeztetett, de érdeklődést keltett bennem, hogy a tudományt az elbeszélő szemszögéből lássam. Van egy könyv, amit adaptálni szeretnék – most csak annyit mondok, hogy molekuláris biológiával és zenével foglalkozik. Remélhetőleg továbbra is megmarad az igény ilyen filmek iránt.

(<http://www.theguardian.com/>)



Gyere el a múzeumba!

A kiállítás
korhatár nélkül,
fényképes
igazolvánnyal
ingyenesen
látogatható.

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

Érdeklődni lehet: 75/50-74-32

www.atomeromu.hu

www.facebook.com/paksiatomeromu



Atomenergetikai Múzeum



paksi
atomerőmű

