

fizikai szemle



2013/9

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 Geesops schlotheimi (Bronn, 1825)
háromkaréjos ősrák (trilobita)
schizochroális összetett szeme. Jól
látszanak az egymástól elkülönülten
ülő elemi szemecskék, amelyek
szerkezete a 298–304. oldalakon
található cikkben szereplő trilobita
szeméhez hasonló.

TARTALOM

<i>Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Vértesy Zofia, Bíró László Péter, Bálint Zsolt: Színek harmóniája: a boglárkalepkék szerkezeti kék színének fajfelismerési szerepe – II. rész</i>	293
<i>Horváth Gábor, Egri Ádám: Gömbhibamentes egy- és kétfókuszúság: a trilobitalencsék magjának optikai szerepe – II. rész</i>	298
<i>Baji Zsófia, Mikula Gergő János: Rétegépítés atomi pontossággal a mikro- és nanotechnológiában</i>	305
<i>Gesztli Tamás: Hamarosan itt az október, a Nobel-díjak hónapja – a 2012-es fizikai Nobel-díjakról</i>	310
<i>Radnai Gyula: Száz éve történt: hazai tudósítás Laue briliáns ötletéről</i>	311

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Radnóti Katalin: XVI. Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – beszámoló 2. rész</i>	314
Eötvös-verseny 2013	321

HÍREK – ESEMÉNYEK

	321
--	-----

K. Kertész, G. Piszter, Z. Vértesy, L. P. Bíró, Zs. Bálint: The well-tuned blue: the role of structural colours as optical signals in species recognition of a local butterfly fauna – part II

G. Horváth, Á. Egri: Spherically corrected monofocality or bifocality: optical functions of the central core in lenses of trilobite eyes – part II

Z. Baji, G. J. Mikula: The preparation of layers with atomic accuracy parameters for micro and nano technology purposes

T. Geszti: November approaching – an opportunity for surveying the 2012 Nobel price winning topics

J. Radnai: One century ago: first news in our country about Laue's brilliant idea

TEACHING PHYSICS

K. Radnóti: Report on the XVI. Leo Szilárd Contest in nuclear physics – part II
Eötvös contest 2013

EVENTS

K. Kertész, G. Piszter, Z. Vértesy, L. P. Bíró, Zs. Bálint: Harmonie der Farben: die Rolle des strukturell bestimmten Blaus als optischem Signal zur Erkennung der arteigenen Schmetterlinge – Teil II.

G. Horváth, Á. Egri: Abbildung mit einfachen und doppelten Brennweiten ohne sphärische Verzerrungen: ein Ergebnis spezieller Linsen bei Trilobiten – Teil II.

Z. Baji, G. J. Mikula: Die Herstellung von Schichten mit Genauigkeitsparametern der Atom-Größenordnung für die Mikro- und Nanotechnologie

T. Geszti: Kurz vor November – eine Gelegenheit, sich der Nobelpreis-gekrönten Themen des Jahres 2012 zu erinnern

J. Radnai: Vor hundert Jahren: die ersten Nachrichten in unseren Land über Laues geniale Idee

PHYSIKUNTERRICHT

K. Radnóti: Bericht über den XVI. Leo-Szilárd-Wettbewerb in Kernphysik – Teil II.
Eötvös-Wettbewerb 2013

EREIGNISSE

K. Кертес, Г. Писстер, З. Вертеш, Л. П. Биро, Ж. Балитт: Роль синей окраски бабочек при установлении их рода другими бабочками того же рода – часть вторая

Г. Хорват, А. Эгри: Достижение простой или двойной фокусировки без искажений – назначение средней части в линзах трилобитов – часть вторая

Ж. Байи, Г. Я. Микула: Создание слоев толщиной атомного порядка для целей микро- и нанотехнологии

T. Geszti: Ближко ноябрь – месяц Нобелевских Премий. Пора обозреть премии 2012-го года

Й. Раднаи: Столетие с прибытия к нам вести о блестящей идеи Лауэ

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

K. Radnóti: Отчет о XVI. студентском конкурсе им. Л. Силарда по ядерной физике – часть вторая

Конкурс им. Отвеша 2013

ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXIII. évfolyam

9. szám

2013. szeptember

SZÍNEK HARMÓNIAJA: A BOGLÁRKALEPKÉK SZERKEZETI KÉK SZÍNÉNEK FAJFELISMERÉSI SZEREPE – II. RÉSZ

Kertész Krisztián, Piszter Gábor, Vértesy Zofia, Biró László Péter
MTA TTK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet¹
Bálint Zsolt
Magyar Természettudományi Múzeum²

Szárnypikkelyek szerkezeti felépítése

Amint az a SEM és TEM felvételeken látható (1. ábra az előző szám hátsó belső borítóján), minden vizsgált lepkefaj pikkelyeiben jellegzetes szivacsos szerkezet található. A képeket szemlélve megfigyelhetünk eltéréseket, de pontos mennyiségi különbségek megállapítása lehetetlennek látszik. A SEM képekből a pikkelygerincek, keresztbordák és a legfelső lyukacsos réteg méretei nyerhetők ki, míg a mélységi adatokhoz a TEM képeket használhatjuk. A szivacsos szerű nanoszerkezet adatai az „ablak”-nak nevezett egységből (két gerinc és két keresztborda által meghatározott terület) származnak. Az összes adat három csoportra osztható: gerincek és keresztbordák távolságai és szélességei, a szivacsos szerkezet jellemzői, valamint a TEM képekről leolvasható rétegvastagságok és távolságok (2. ábra). Így összesen 24 adat nyerhető, de a további vizsgálataink szerint 9 paraméter (2. táblázat) elégséges az MNH (mesterséges neurális hálózat) elemzéshez. Összegezve, a 9 faj pikkelyein 450 ablakot mértünk meg, ezek fele az MNH-tanításban vett részt, a többi a tesztelésben. Az eredmények szerint (3. táblázat) a neurális hálózat a 255 ablakból 205-öt helyesen határozott meg, ami 91%-os találatot jelent.

A munka az OTKA PD 83483, és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

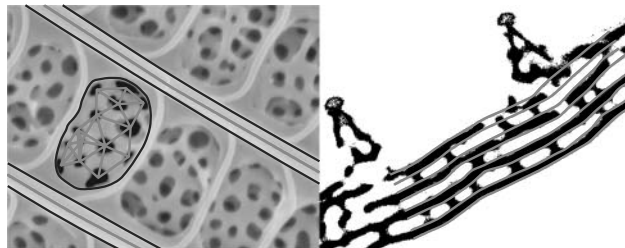
¹ www.nanotechnology.hu

² www.nhmus.hu

Lepkeszárnyak optikai tulajdonságai

Korábban megmutattuk, hogy egy adott fajhoz tartozó egyedek színe gyakorlatilag megegyezik [8]. A fajok spektrális megkülönböztetésének automatizálását a normált és átlagolt visszaverési spektrumokon (3. ábra) végeztük. A spektrumok jellemzőit (4. ábra) a következő paraméterek határozzák meg: a csúcs maximumának hullámhossza, az intenzitás ebben a pontban, a csúcs területe és félértékszélessége, a csúcs talppontjainak helyzete és a félértékszélesség két oldalának értéke. Ez 8 paraméter csúcsonként, ami összesen a három csúcsra (a főmaximum, valamint balra két kisebb intenzitású csúcs) 24 bemeneti adatot jelent a mesterséges neurális hálózatba. Minden fajból legkevesebb 10 példányt mér-

2. ábra. A „Biophot Analyzer” program használata SEM és TEM képek feldolgozásához. Balra: a program felhasználói segítséggel sötétben bejelöli a szerkezeti lyukak által elfoglalt részt, majd megadja az alakra és egymástól való távolságra vonatkozó statisztikát; ugyanitt mérődnek a szerkezeti gerincek és keresztbordák adatai is. Jobbra: a binarizált TEM képen a rétegek vastagsága és egymástól való távolsága mérhető (színesben lásd [7]).



2. táblázat

A SEM és TEM felvételekből nyerhető legfontosabb 9 paraméter

1. a szivacsos szerkezet kitöltési tényezőjének (tömör/üres részek) átlaga
2. a szerkezeti lyukak körtől való eltérésének átlaga
3. a lyukba írható kör eltérésének átlaga a szerkezeti gerinckel párhuzamosan mért lyuk átmérőjétől
4. a lyukak tömegközéppontjának a szomszédoktól mért átlagos távolsága
5. a lyukak szomszédjainak átlagos száma
6. a lyukak első szomszédjainak maximális távolsága
7. gerincek átlagos szélessége
8. rétegszám a TEM képeken
9. átlagos rétegvastagság a TEM képeken

Összesen 225 ablak (a pikkely két gerince és két keresztbordája által meghatározott terület) adatai kerültek az MNH bemenetére.

tünk, amelynek fele vett részt az MNH tanításában. Az eredményeket a szerkezeti vizsgálathoz hasonlóan közöljük (4. táblázat), a spektrumok alapján végzett faj szerinti osztályozásban a találati pontosság 96% volt.

A lepkefajok rajzasi eloszlása egy vegetációs időszak (év) alatt

A rajzasi időszakok meghatározására a lepkék befogási idejét használtuk fel. Ehhez a Természettudományi Múzeum Állattárában feljegyeztük 285 lepke befogási idejét (hónap, nap), és ezt egy hisztogramban ábrázoltuk (5. ábra). A lejegyzett minták nagy száma szükséges az eloszlás követése és az évenkénti eltérő éghajlati viszonyok hatásának átlagolása miatt.

A lepkék látására vonatkoztatott szintér

A színek megkülönböztetésére használt egyik ábrázolási mód a CIE (Commission internationale de l'éclairage) szín-inger-háromszög [10], amely a színek emberi látáshoz illeszkedő kétdimenziós megjelenítése. Korábban már végeztünk ehhez hasonló vizsgálatot [8], viszont figyelembe kell venni, hogy a vizsgált lepkék nem az emberre jellemző há-

3. táblázat

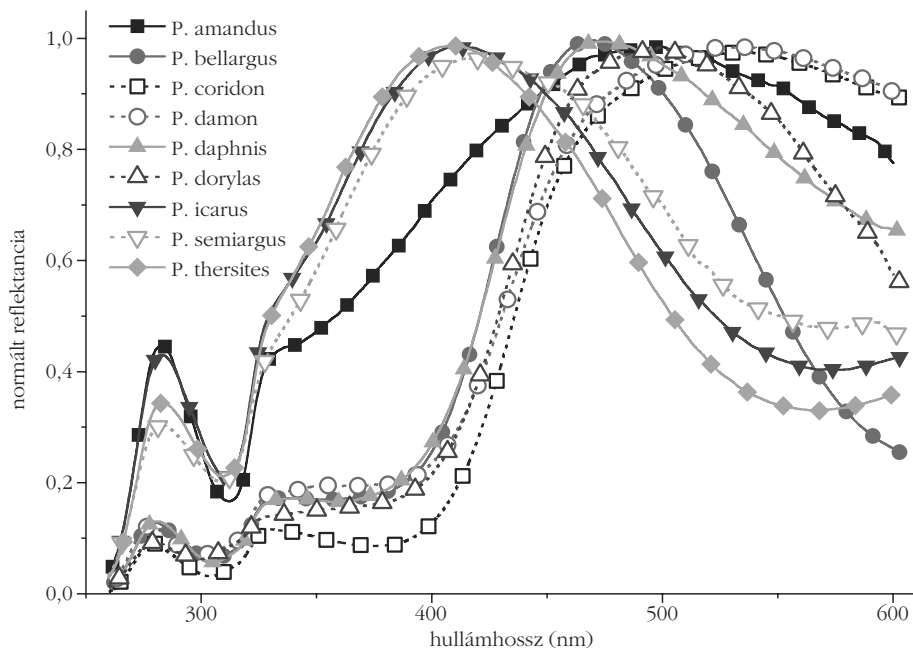
Az MNH kimeneti találat/tévedés táblája a szerkezeti adatokra

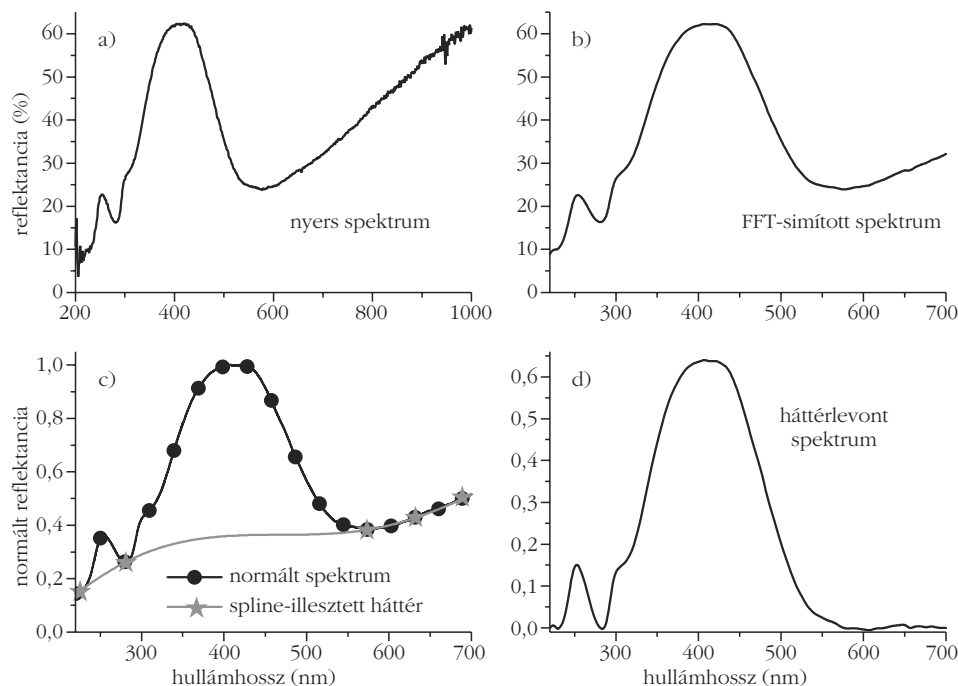
eltalált/várt	<i>amandus</i>	<i>bellargus</i>	<i>coridon</i>	<i>damon</i>	<i>daphnis</i>	<i>dorylas</i>	<i>icarus</i>	<i>semiargus</i>	<i>thersites</i>
<i>amandus</i>	14	0	0	2	0	0	0	2	0
<i>bellargus</i>	0	28	0	0	0	0	0	0	0
<i>coridon</i>	0	0	45	0	0	0	0	0	0
<i>damon</i>	1	0	0	29	0	1	0	1	0
<i>daphnis</i>	0	0	0	0	15	0	0	0	0
<i>dorylas</i>	0	0	0	0	0	13	1	0	0
<i>icarus</i>	2	0	0	0	0	0	41	1	0
<i>semiargus</i>	1	0	0	0	0	0	2	7	2
<i>thersites</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	13

A helyes válaszok az átlón vannak. 225 ablak (a pikkely két gerince és két keresztbordája által meghatározott terület) adatai tesztelésre, és ugyanennyi a hálózat betanítására lett felhasználva. A helyes találatok aránya 91%.

romféle szín érzékelésére képes fotoreceptorokkal rendelkeznek, hanem ez kiegészül egy negyedik érzékelővel az ultraibolya (UV) tartományban. Ez a tény a színek minőségileg más jellegű megkülönböztetését teszi lehetővé. Hogy megtudjuk, miként látják egymást ezek a lepkék, a CIE szín-inger-mérő rendszerre alapozva háromdimenziós leképezést készítettünk (lásd [7], 5. függelék). A kapott adatokat ábrázolva (6. ábra és [7], 2. függelék) láthatjuk, ahogy az egyes lepkefajok jobban elkülönülnek, mint a korábban használt CIE diagram esetében [8].

3. ábra. Kilenc lepkefaj kék szárnyának átlagolt fényvisszaverési spektruma. Az egyszerűbb összehasonlítást elősegítendő, a görbék a spektrum kék tartománybeli főmaximumára normáltak. Zajszűrésre FFT (Fast Fourier Transform) szűrőt használtunk (színesben lásd [7]).





4. ábra. Optikai spektrumok előfeldolgozása. (a) Nyers adatok. (b) FFT-szűrés utáni adatok. (c) Meghatározott pontokon (csillag) áthaladó közelítés megadása. (d) Az illesztett görbe levonása után kapott spektrum. Ezeket követően „Origin 8” program segítségével a spektrum csúcsainak helyzete, intenzitása, területe, félértékszélessége, a talppontok bal és jobb oldali helyzete, valamint a csúcsok bal és jobb oldali szélessége a magasság felénél került meghatározásra.

A kék szín szerepe a párkeresésben

Míg a kutatók a lepkeszárny fonák oldalának mintázatát használják a fajok azonosításra (ami laboratóriumi, preparált lepkék esetében jól működik), addig a repülő hím lepkéknek ezt a fajra jellemző apró mintázatot kellene felismerniük egy vizuálisan összetett növényi környezetben (harmincszorosan lassított videofelvétel: [7], 3. függelék). Hasonlóan, a nőtényeknek a gyors szárnymozgású hímeket kellene felismerniük (harmincszoro-

4. táblázat

Kimeneti találat/tévedés tábla a spektrális adatokra

eltalált/ várt	<i>amandus</i>	<i>bellargus</i>	<i>coridon</i>	<i>damon</i>	<i>dapbnis</i>	<i>dorylas</i>	<i>icarus</i>	<i>semiargus</i>	<i>thersites</i>
<i>amandus</i>	5	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>bellargus</i>	0	10	0	0	0	0	0	0	0
<i>coridon</i>	0	0	4	0	0	0	0	0	0
<i>damon</i>	0	0	1	5	0	0	0	0	0
<i>dapbnis</i>	0	0	0	0	5	0	0	0	0
<i>dorylas</i>	0	0	0	0	0	10	0	0	0
<i>icarus</i>	0	0	0	0	0	0	5	0	1
<i>semiargus</i>	0	0	0	0	0	0	0	5	0
<i>thersites</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	4

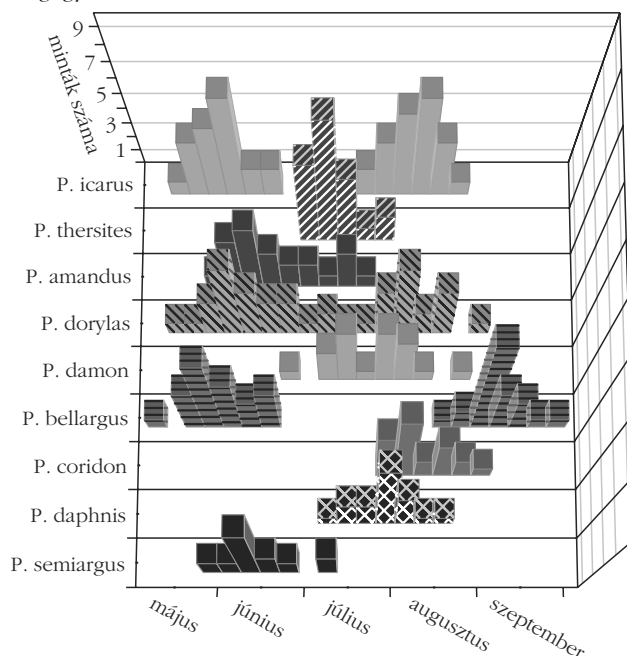
A helyes válaszok az átlón olvashatók. Teszt 55 példányon, a helyes találatok aránya 96%.

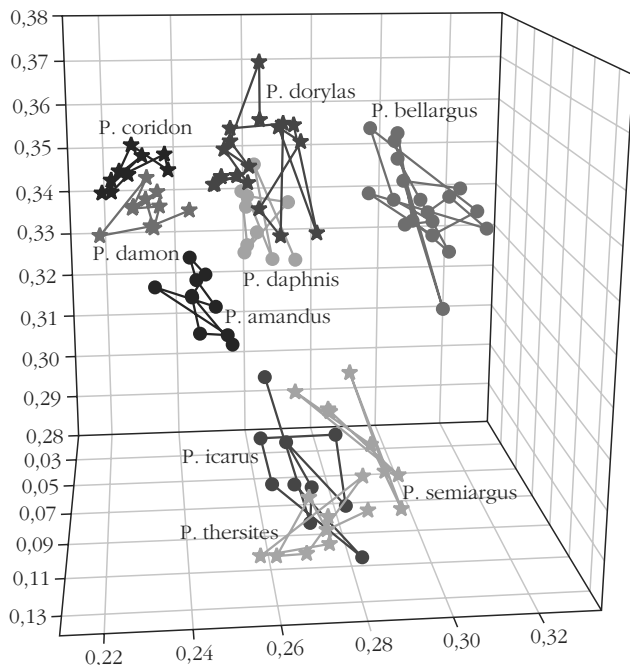
san lassított videofelvétel: [7], 1. függelék). Kérdéses, hogy a lepkék agya képes-e feldolgozni ilyen gyorsan a vizuális információkat (egy szárnycsapás 10-20 ms idejű) és a szárnyfonák bonyolult mintázatát sikeresen felismerni. Vegyük azt is figyelembe, hogy az egyes fajok szárnyfonájának mintázata legtöbbször csak kis mértékben tér el; továbbá, a lepkék között gyors röptűnek számító boglárkalepkéknél a távoli felismerés nagyon előnyös lehet, hogy megelőzhessék a sikertelen párzási próbálkozásokat.

A tanulmányozott hímek ugyan rendelkeznek illatpikkelyekkel, de ezek szerepe a párválasztásban csak részben tisztázott, és az eredmények arra utalnak, hogy szerepük nem

egyeznek meg az éjszakai lepkéknél tapasztalt nagy távolságú, feromon alapú vonzással. A saját élőhelyükön történt megfigyelések alátámasztják, hogy a hímek és nőtények illatanyagainak is csak testközelből van szerepük. Nem ismert, hogy a vizsgált lepkéfajok ivarszervi szerkezete önmagában mennyire hatékonyan gátolja a kereszteződéseket (hibridek létrejöttét), hiszen a fajok mesterséges körülmények kö-

5. ábra. A vizsgált lepkéfajok időbeni előfordulása élőhelyükön. Jól megfigyelhetők az átfedő és az elkülönülő nemzedékek.





6. ábra. A megvizsgált lepkefajok elhelyezése a színtérben (lásd [7] 5. függelék). A pontok egyedeket jelölnek, a csoportosulások fajoknak felelnek meg. A hasonlóság a távolság csökkenésével növekszik.

zött párosíthatók. Ha az ivarszervek szerkezete eléggé eltérő is lenne, a párzási próbálkozást általában egy hosszas udvarlás előzi meg. Így nagyon fontos lehet bármilyen optikai vagy kémiai jelzés, ami segíti a fajok megkülönböztetését, hiszen ezáltal felesleges energiabefektetés előzhető meg. Kísérletileg is bizonyították a kémiai jelzés hatását a *Lycaeides argyrognomon* lepkefajnál: a hím által kibocsátott illatanyagok hatására a nőstény a befogadó testhelyzetet veszi fel.

A boglárkákra vonatkozóan az irodalom hivatkozik arra, hogy ha a nőstény vonzza a hímeket, akkor az közel repül és megkezdheti az udvarlást. Ez ellentmond annak az egyértelmű ténynek, hogy a hím minden tekintetben sokkal feltűnőbb. Ha a hím a látványában (sokkal élénkebb szín), az illatanyagok tekintetében (jelentős mennyiségű illatpikkely jelenléte miatt intenzívebb kémiai jelzés, mint a nősténynél) és a mozgékonyágában is feltűnőbb, felmerülhet a kérdés, hogy mi a nőstény jelzése? Szintén ez a kérdés vetődik fel, ha a nőstény szárnyfonákján található sárga foltokat tekintjük a legfontosabb jelzésnek. Ezek a foltok a hímek számára abban az optikailag bonyolult környezetben, ami a fűben üldögélő nőstényt körülveszi, gyakorlatilag láthatatlanok. A kísérletek szerint a *Polymmatius icarus* szeme a szárnyak kék színére a legérzékenyebb.

Szabadtéri megfigyeléseink és mások munkái is azt bizonyítják, hogy a nőstények és hímek viselkedése nagyon eltérő. A bából kikelt nőstények nem mutatkoznak, a növényzetben elbújva a kikelés helyén maradnak, és csak akkor repülnek, amikor a hím közeledik, hogy felhívják magukra a figyelmet. Bár szabad téren nem teszteltük, de az a hipotézisünk, hogy erre a hívó táncra csak akkor kerül sor, ha megfelelő színű

hím közeledik. A jelenség nehezen figyelhető meg, mivel a nőstények leginkább párzás, táplálkozás vagy petézés közben láthatók.

A szubtrópusi-trópusi erdőkben található rokon boglárkafajok más stratégiát alkalmaznak: a nőstények még a bábban tartózkodva erős illatanyagokat bocsátanak ki, és ezzel vonzzák a hímeket. A mérsékelt klímájú füves területeken nincs ilyen megfigyelés. A vizsgált boglárkafajok hernyói hangyák járataiban telelnek, onnan is kelnek ki, és amikor elhagyják a talajt, egy fűszálon kapaszkodva tudják a szárnyaikat kifeszíteni és megszáritani. Közvetlenül ezután a párkeresés és a párzás is megtörténik, ezért a gyűjteményekben is nehéz nem megtermékenyített nőstényt találni.

Szerkezeti és optikai tulajdonságok

Bár a pikkelyszerkezet teljes háromdimenziós szerkezetének feltárását leginkább a TEM tomográfia tenné lehetővé, SEM és ugyanolyan területről készített TEM képek megfelelően feldolgozva, elég sok jellemzőt megmutatnak. A cikkünkben vizsgált szárnypikkelyek első látásra nagyon hasonlóak, mégis jól érzékelhető az általuk keltett színkülönbsége. A szerkezet MNH-elemzése megmutatta, hogy a pikkelyek adatai jellemzőek az egyes fajokra. Korábban az *Albulina metallica* faj esetében megmutattuk, hogy a szivacsos szerkezet parányi eltérései miképpen befolyásolják a szárnyak színét [3]. A fényvisszaverés spektrális maximumának legfontosabb meghatározója a szivacsos szerkezetben a lyukak távolsága és a kitin kitöltési tényezője. A Biophot Analyzer programmal meg lehet határozni felszíni (SEM képek) és mélységi (TEM képek) adatokat is. A tárgyalt fajok esetében 9 adatot határoztunk meg a fajok hatékony megkülönböztetéséhez (2. táblázat). Megfelelően nagy számú bemeneti adat mellett automatikusan is el lehet különíteni az egyes fajokhoz tartozó mikroszkópos képeket. Az algoritmus által elkövetett legnagyobb hiba a 3. táblázatban a *P. icarus* faj *P. thersites*ként való azonosítása. Ezek visszaverési spektruma (3. ábra) nagyon hasonló, a spektrális adatokat összehasonlító MNH is itt követett el hibát (4. táblázat). A másik a *P. coridon* egyik példányának *P. damon*ként való azonosítása. Ez a hiba a lepkék életkorának előrehaladásával a felső rétegben levő kék pikkelyek elvesztésének tulajdonítható. A megmaradó alappikkelyek barna melanin festékanyagot tartalmaznak, és ez okozza a fényvisszaverés növekedését a 600-800 nm hullámhossztartományon.

Ha összességében tekintjük a szerkezet és a szín MNH-elemzését, láthatjuk, hogy a fajra jellemző színek illeszthetőek a fajra jellemző szerkezetekkel. Tekintettel arra, hogy a szerkezet SEM képeken szabad szemmel láthatóan nagyon kis megváltozása felelős a jelentős színi eltérésekért, a fotonikus nanoarchitektúra feltehetően rendkívül hatékonyan és stabilan van beírva a fajok genetikai állományába. Nagyon valószínű, hogy a nem megfelelő színnel (és szerkezettel) rendelkező

egyedek hamar kiküszöbölődnek a párzási folyamatból. Ez azt sugallja, hogy ahol a színnek szerepe van a kiválasztódásban, érdemes részletes szerkezeti és optikai elemzésnek alávetni a rokon fajok pikkelyszerkezeteit, mert egy ilyen munka számítógépes modellekkel kiegészítve új ötletekkel szolgálhat a bioinspirált fotonikus nanoszerkezetek tervezésében.

Figyelembe véve a lepkék szemében levő UV-érzékeny színérzékelő receptortípust is, a lepkék által érzékelt színtér egy dimenzióval kiegészül az emberi színlátáshoz képest. Így a 110 példány spektrumait egy 3D diagramon ábrázolhatjuk, ahol a pontok közötti kisebb távolságok a színek közötti kisebb különbségeket jelentenek, ahogy azt a lepkék látják. Következésképpen, az emberi szemhez illeszkedő 2D színingertérben részlegesen átfedő részek a 3D színingertérben jól elkülönülnek. Amint az elforgatott diagramon látszik ([7], 5. függelék), vannak olyan metszetek, ahol bizonyos lepkefajok átfednek, mégis összességében a 3D-ben elkülönülnek. A negyedik színérzékelő lehetővé teszi az UV tartományon belüli jobb szétválasztást, és ez éppen egybeesik azzal a hullámhossztartománnyal, ahol a kék szárnyak spektrális jellegzetességei vannak. Az alábbiakban a 3D színingerdigram és a repülésiidő-diagram együttes használatával megmutatjuk, hogy a különböző kék árnyalatú lepkék egy közös életterben lehetnek anélkül, hogy zavarnák egymás párzását, míg a közel azonos árnyalatú lepkék az év más szakában repülnek.

A hímek szárnyának kék színe

Színüket tekintve (1. és 3. ábra) három csoportra oszthatjuk a vizsgált fajokat, és ez a feloszthatóság látható a 3D színingerdigramon (6. ábra) is: lila (*P. icarus*, *P. semiargus* és *P. thersites*), égszínkék (*P. bellargus*, *P. daphnis* és *P. dorylas*) és zöldes (*P. amandus*, *P. coridon* és *P. damon*). A lila csoportban a visszaverési csúcs keskenyebb, mint a többi fajnál. Mivel a főmaximumok jól fedik egymást, szabad szemmel nehezen lehet megkülönböztetni a színüket (1. ábra). A másodlagos maximumoknak (250 nm körül) köszönhetően a 3D színingertérben jól elkülönülnek. A kék csoport spektruma kiszélesedik, a rövidebb hullámhosszú oldal helyzete nem változik, míg a hosszabb hullámhosszú lefutás jobbra tolódik. Egy plató is látható mindhárom spektrumon 325–400 nm között, ami egybeesik a lilák főmaximumának vállával. A 250 nm-nél látható másodlagos maximumok fedésben vannak. A zöldes csoportra a még erőteljesebb kiszélesedés jellemző. A *P. amandus* eltérő, amennyiben a visszaverési spektrumában egy határozott váll van 325 nm-nél, amint a lila csoportnál is láthattuk, és 250 nm körül van a másodlagos maximum. A zöldes csoport másik két tagja rövidebb hullámhosszúnál a kék csoport tagjaihoz hasonlít. Az 1. ábra SEM képein megfigyelhető, hogy a *P. amandus* szivacsos szerkezetének kitöltési tényezője nagyobb, mint a lila csoport tagjainak, míg a zöldes csoport

másik két tagja, amelyeknek szintén nagyobb a kitöltési tényezője, mint a kék csoportban, ezzel együtt szélesebb szórást mutat a lyukak méretében, mint a kékek esetén. Modellezéssel kiegészített további munkára van szükség, hogy mélységében megértsük a szerkezet és a spektrum összefüggését. A tény, miszerint az MNH 91%-os találattal képes az egyes fajokhoz tartozó szerkezeteket azonosítani a visszaverési spektrum fajra jellemző kiegészítésével, arra utal, hogy a jól meghatározott szerkezeti jellegzetességek felelősek a szín kialakulásáért. Ez nem olyan egyszerű, mint a tökéletesen rendezett szerkezeteknél, ahol a törésmutatót állandónak véve, a szerkezet periodicitása egyértelműen meghatározza a fotonikus tiltott sáv helyét. Érdemes vizsgálni a szerkezetek és tulajdonságaik összefüggését, mivel a lepkék szárnyán található kvázirendezett szerkezetek bizonyítják ezen nanokompozitok lehetőségét.

Lepkék előfordulása a vegetációs időszakban

Az 5. ábrán a vizsgált lepkefajok eloszlását láthatjuk hónapok szerint. Egy, illetve két maximummal rendelkező csoportokat fedezhetünk fel, amelyek azt mutatják, hogy a *P. icarus*, *P. dorylas* és a *P. bellargus* esetében a nyár eleji nemzedék után egy második is repül a nyár vége felé. Bár nagy szórás van (a mintákat véletlenszerűen választottuk az 1930 és 2010 közötti időszakból), a hisztogramok határozott maximumot mutatnak. Hogy a kék szín a fajok megkülönböztetésére alkalmas távoli kommunikációs jel legyen, a színeknek nagy távolságból is jól láthatóan különbözniük kell. Ezért a megvizsgált boglárkák csoportjára jellemző negyedik fajta (UV-érzékeny) színérzékelő részletesebb megkülönböztetést tesz lehetővé, mint az emberi szem. A kiegészítő UV-érzékelő a 300–450 nm tartományon segíti a színelbontást. Ez épp az a tartomány, ahol a szárny visszaverésében a másodlagos maximum és a főmaximum bal oldala van. Tudomásunk szerint első alkalommal végeztük el a számolást a CIE ábrázolást felhasználva a négy érzékenységi görbére a lepkék látásának vizsgálatára (6. ábra). Ez a megközelítés hasznos lehet más lepkék vizsgálatának esetében is. Fontos viszont megjegyezni, hogy bizonyos fajok akár nyolcféle színérzékelővel is rendelkezhetnek, így ezekhez többdimenziós ábrázolás szükséges.

A repülési időket tekintve, a lila csoportban a *P. icarus* és a *P. thersites* nagyon hasonló színű, de a *P. thersites* rajzása (egy nemzedék) beékelődik a két *P. icarus* nemzedék közé. A *P. thersites* repülési idejének eltolódása július vége felé megengedett, mivel az akkori példányok már öregek, ezáltal kopottak, és nem zavarják a *P. icarus* második generációjának nászrepülését. Átfedés figyelhető meg a *P. icarus* és a *P. semiargus* esetében is, de a hisztogramon láthatjuk, hogy a *P. icarus* első nemzedéke május közepéig tetőzik, amikor az első *P. semiargusok* megjelennek, és egészen hosszan tart a repülési idejük,

június közepi tetőzéssel. A *P. thersites* példányok csak a *P. semiargus* nemzedék végén kezdenek repülni, amikor már csak idős példányok fordulnak elő.

Az égszínkéek csoportból a *P. bellargus* és a *P. dorylas* is kétnemzedékes. A *P. bellargus* rendelkezik a legkorábbi és legkésőbbi tetőzéssel, és bár van valamennyi átfedés a *P. dorylas* repülésével, spektrálisan jól láthatóan különböznek. A *P. dorylas* második nemzedékének repülési ideje teljesen átfed a *P. daphnis* előfordulásával. Bár a színük lehetővé teszi a megfelelő megkülönböztetést, a két faj elkülönülését azon egyedi jelenség is segíti, hogy a *P. daphnis* nőtényei mindig kékek.

A zöldes csoport tagjai egynemzedékesek. Elsőként a *P. amandus* jelenik meg, ami színében is eltér a többitől. Június közepére már megfakul a szárny színe annyira, hogy ne zavarja a megjelenő *P. damon* faj pázását. A *P. coridon* és a *P. damon* váltják egymást, a rendszerint nagy számban kirajzó *P. coridon* már csak az idős, kevés számú *P. damon* hímmel találkozhat az élőhelyen.

A fenti csoportosulásokon kívül meg kell jegyezzük a kétnemzedékes *P. icarus*, *P. dorylas* és *P. bellargus* esetét. Május közepén vagy végén tetőzik az első nemzedékük, de a színük jellegzetesen elkülönül, tehát ennek alapján az ugyanazon fajhoz tartozó egyedek azonosítani tudják egymást.

Következtetések

Kilenc közeli rokon (és azonos földrajzi helyen élő) boglárka lepkefaj részletes szerkezeti és spektrális vizsgálata megmutatta, hogy a hímek szárnyának kék színe és a színért felelős fotonikus nanoszerkezet fajra jellemző. Mesterséges neurális hálózatot alkalmazva, a szerkezeti vagy a spektrális adatok alapján is a fajokat 90% feletti találati aránnyal lehet azonosítani. A fajok repülési idejét tekintve az látszik, hogy a hasonló színű lepkék időben elkülönülnek. A lepkék ultrabolya-érzékeny fotoreceptor-típusát figyelembe vevő, háromdimenziós színingertérben ábrázolva, az eltérő fajok szárnyszínerei jobban elkülönülnek egymástól, mint az emberi látáson alapuló, kétdimenziós színingertérben. A repülési időszakokat tekintve, a vizsgált 9 boglárkafaj kék színe lehetővé teszi a biztonságos párkeresést, illetve a versenytársak eredményes kiszűrését.

A szerkezet-szín összefüggés vizsgálata modellezéssel együtt lehetővé teszi új utak feltárását a bioinspirált, kívánt színárnyalatú mesterséges fotonikus nanoarchitektúrák tervezésében és azok gyakorlati alkalmazásában.

Irodalom

10. Lukács Gy.: *Színmérés*. Műszaki Kiadó, Budapest, 1982.

GÖMBIHI BAMENTES EGY- ÉS KÉTFÓKUSZÚSÁG: A TRILOBITALENCSEK MAGJÁNAK OPTIKAI SZEREPE – II. RÉSZ

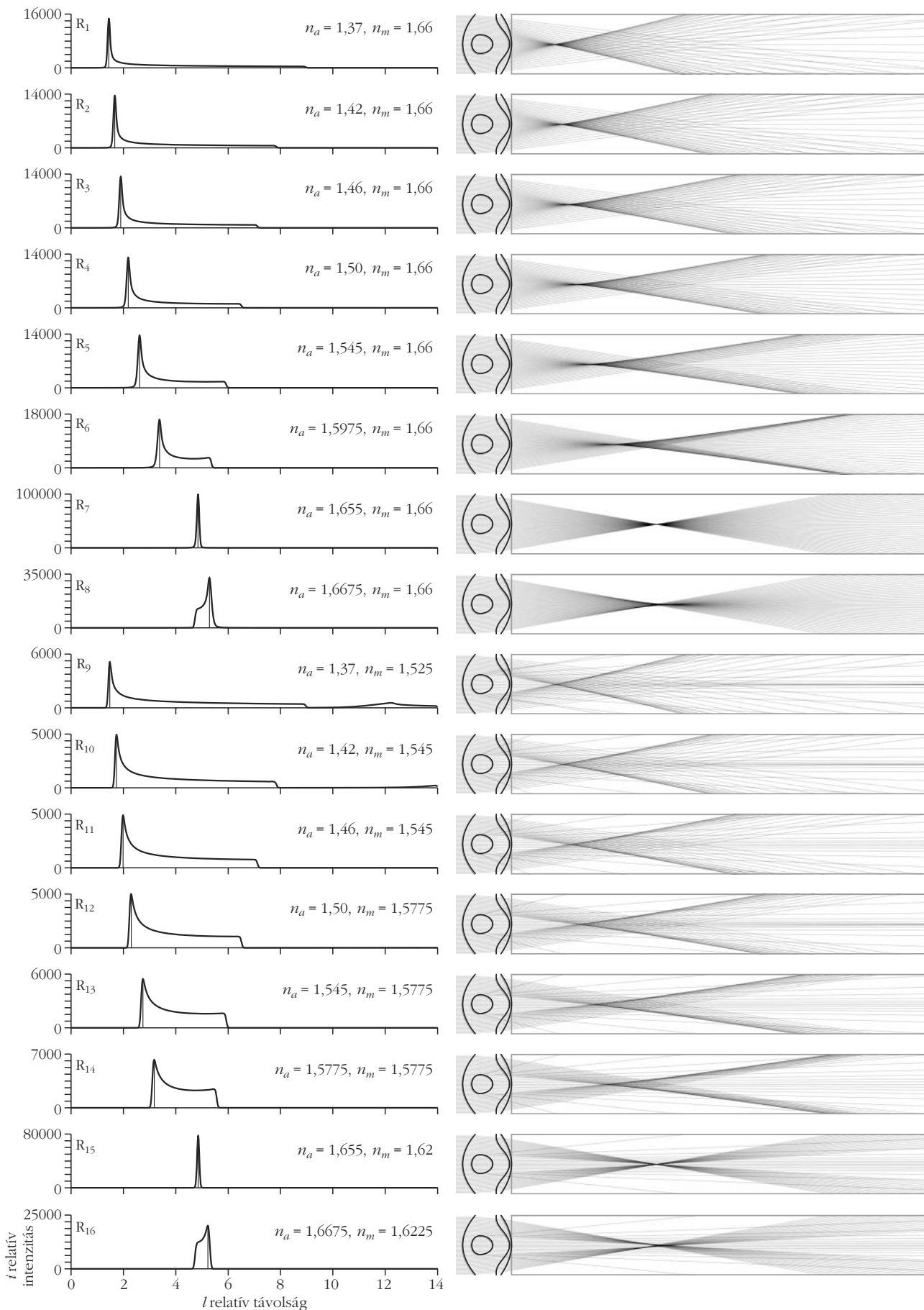
A központi lencse mag szerepe bizonyos schizochroális szemű háromkaréjos ósrákokban (trilobitákban) máig ismeretlen volt. Azért, hogy megértsük e rejtélyes lencse mag lehetséges optikai szerepét, cikkünk I. részében egy számítógépes sugárkövetéses módszert írtunk le, amivel egy szilur kori *Dalmanites* trilobitafaj összetett szeméibeli lencsék optikája vizsgálható [19]. Cikkünk II. részében számításokat végzünk annak kiderítésére, hogy milyen fényintenzitás alakul ki a lencse alatt az optikai tengely mentén. Számításainkban két paraméter szerepel: az alsó lencsetag n_a és a lencse mag n_m törésmutatója. Meghatározzuk n_a és n_m azon értékeit, amelyek esetén a vizsgált trilobitalencse egy, kettő, illetve három fókuszponttal rendelkezik. A fókuszpontok jóságát (a gömbi hiba kiküszöbölésének mértékét) számszerűen vizsgáljuk. Megmutatjuk, hogy a lencse mag egyik szerepe a gömbi hiba kiküszöbölése volt a fókuszpontok számától (1, 2 vagy 3) függetlenül, de akár a lencse kétfókuszúságát is biztosíthatta. A lencse mag másik lehetséges szerepe, hogy a lencse szélső tartománya egy meghatározott fókusz-távolsággal rendelkezett, míg a központi lencserész-

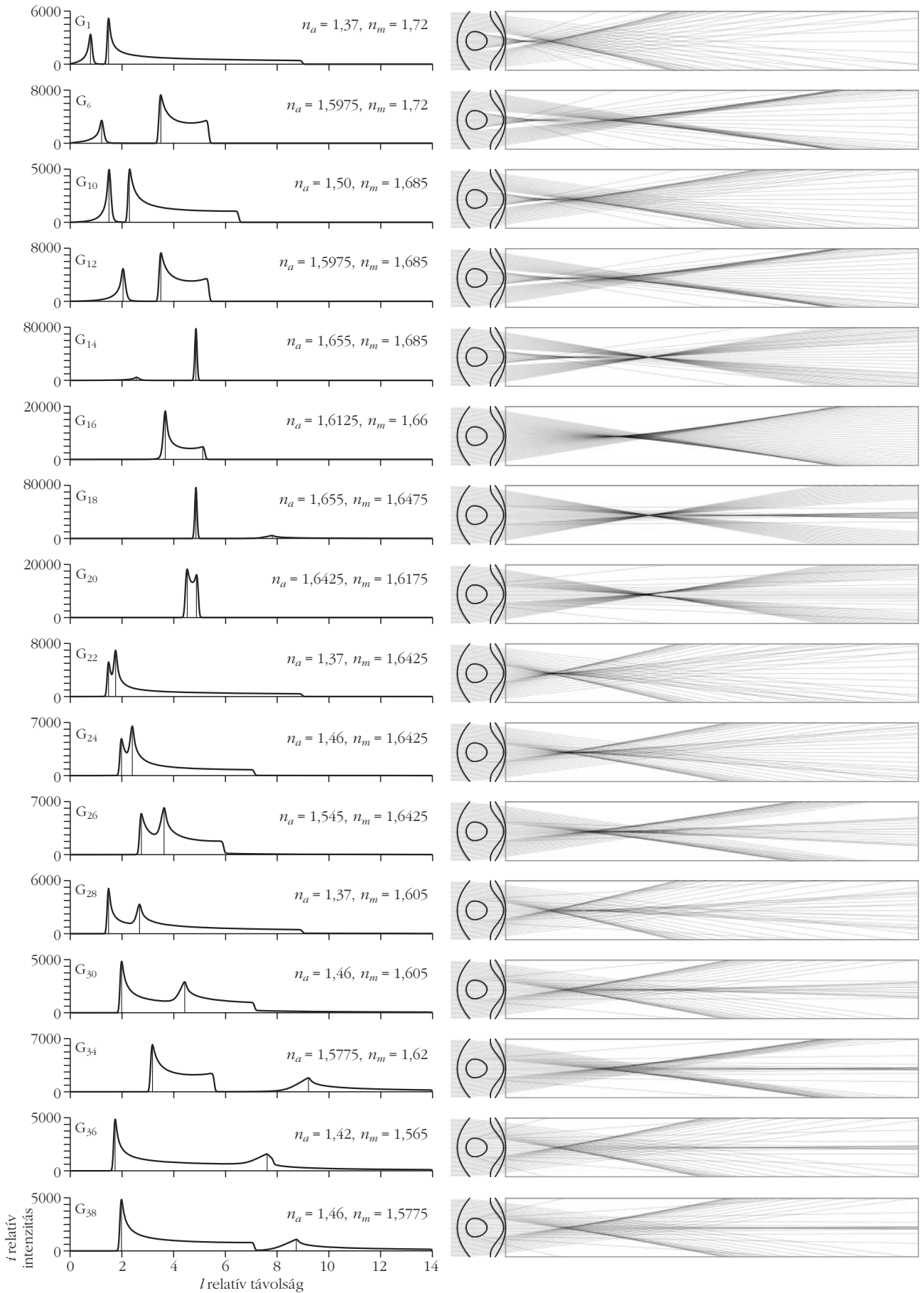
nek hosszabb vagy rövidebb volt a fókusz-távolsága attól függően, hogy a lencse mag n_m törésmutatója kisebb vagy nagyobb volt a felső lencsetag n_l törésmutatójánál. Megvizsgáljuk azon paraméterértékeket is, amelyek háromfókuszú lencséhez vezetnek, de ezt a lehetőséget kizártuk a biooptikailag értelmes megoldások közül.

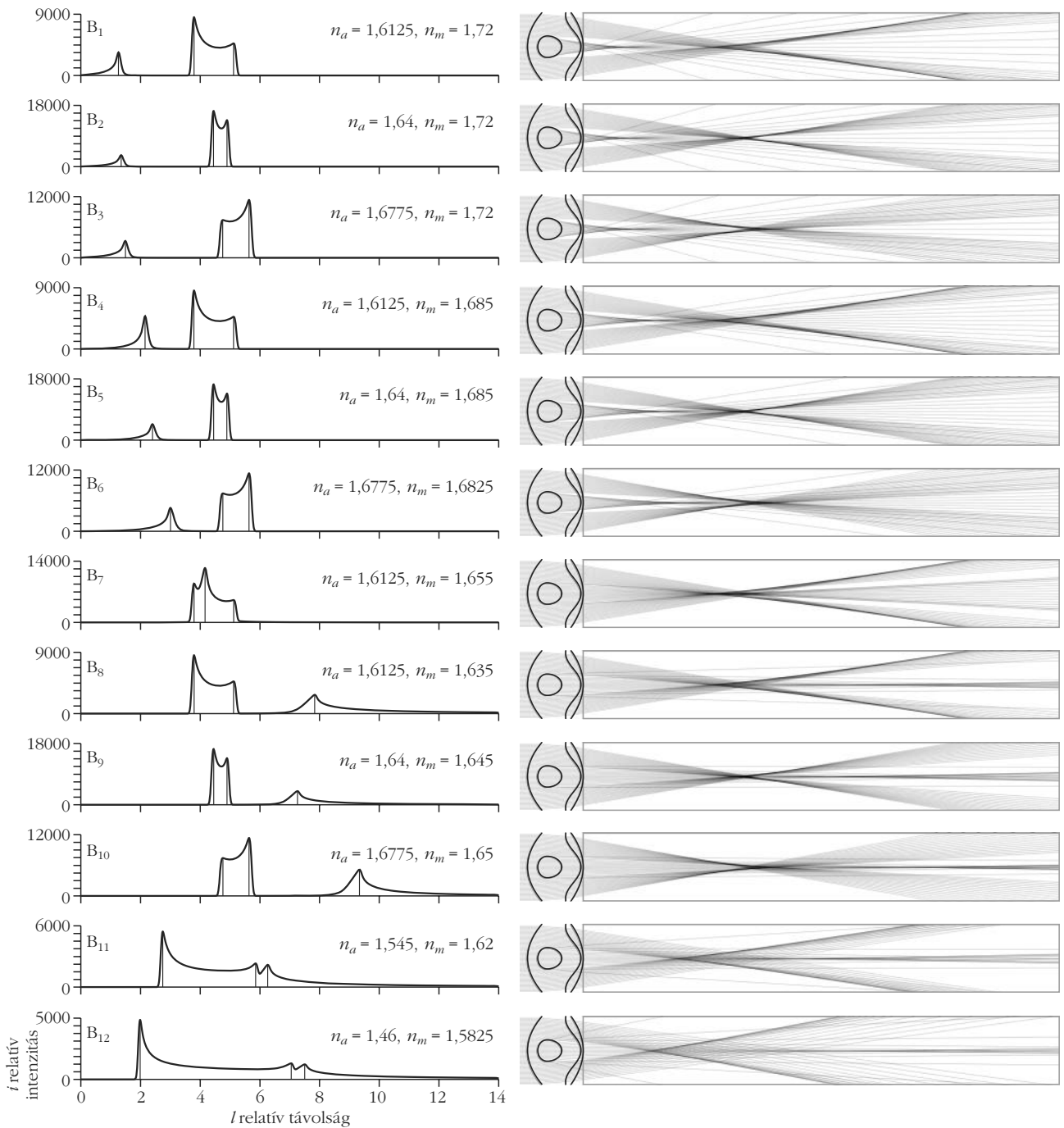
Paleo-biooptikai eredmények

A 6. ábrán példák láthatók a lencse alatt az optikai tengely mentén kialakuló i relatív intenzitásra a lencse aljától mért l relatív távolság függvényében, ami-

A következő oldalon: 6. ábra. Balra: példák az $i(l)$ relatív intenzitás-görbékre a központi maggal rendelkező trilobitalencsétől mért l relatív távolság függvényében, amikor a görbéknek csak egy csúcsa van. Az intenzitás-csúcsok helyét egy vékony függőleges vonal jelzi. Az adott intenzitás-görbéhez tartozó n_a és n_m törésmutató-értékek a grafikonok jobb felső sarkában olvashatók. Az R_1, \dots, R_{16} címkék a 9. ábra megfelelő címkéihez tartoznak. Jobbra: a bal oldali intenzitás-görbékhöz tartozó sugármenetek a lencse főtengelymetszetében.







8. ábra. Mint a 6. ábra, de most trifokális lencsére. A B₁, ..., B₁₂ címkék a 9. ábra megfelelő címkéihez tartoznak.

kor az $i(I)$ görbe egyetlen csúccsal rendelkezik. Az n_a és n_m törésmutatók különböző értékei eltérő görbékhez vezetnek. A 7. és 8. ábra kettő és három intenzitás-csúcsú $i(I)$ görbékét mutat. A 6–8. ábrák jobb oldalán a bal oldali $i(I)$ görbékhez tartozó sugármenetek láthatók a lencse főtengelymetszetében.

A 7. ábra szerint, ha a lencsemag n_m törésmutatója különbözik a felső lencsetag $n_f = 1,66$ törésmutatójától, akkor két fókuszterületet kapunk: (i) az egyik fókusz a lencse középső része hozza létre a magot

beleértve, míg (ii) a másikat az alsó és felső lencsetag külső gyűrűje. Cikkünkben fókuszpontnak a maximális intenzitással rendelkező helyet nevezzük. Ezen intenzitás-csúcsok nem nevezhetők egzakt fókuszpontoknak, mivel az intenzitás-csúcsok Gauss-függvény szerűen elkennek.

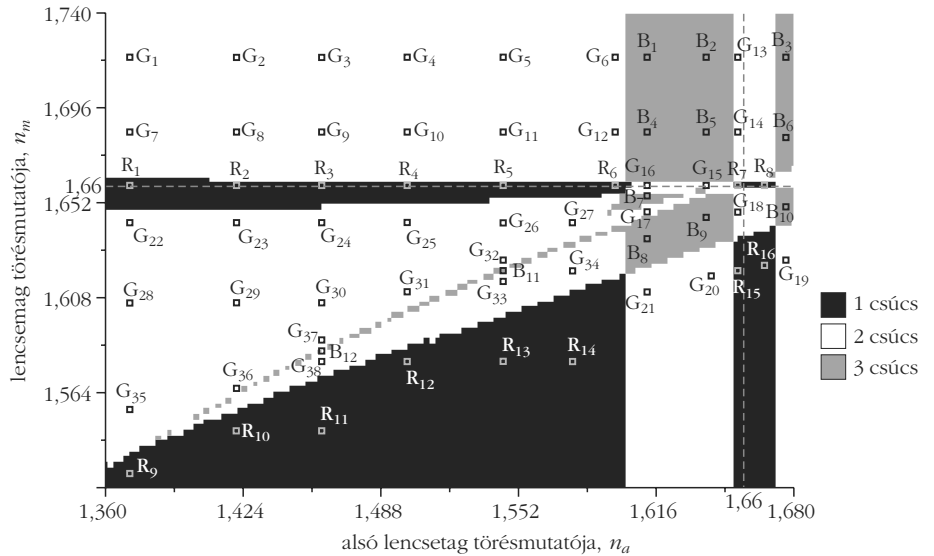
Az n_a és n_m törésmutatók függvényében a 9. ábra mutatja, hogy hány (1, 2 vagy 3) csúccsal rendelkezik az $i(I)$ intenzitás-görbe. A 9. ábrán a függőleges és vízszintes szaggatott vonal jelképezi a felső lencsetag 1,66 törésmutatóját, tehát e vonalak metszéspontjában helyezkedik el az $n_a = n_m = 1,66$ eset. Az $n_m = 1,66$ esetén központi mag nélküli lencséről beszélhetünk,

Az előző oldalon: 7. ábra. Mint a 6. ábra, de most bifokális lencsére. A G₁, ..., G₃₈ címkék a 9. ábra megfelelő címkéihez tartoznak.

mert ugyanakkora a magot körülvevő kalcit törésmutatója is. Ugyanakkor $n_a = 1,66$ mellett az alsó lencsetag rendelkezik a felsőével azonos törésmutatóval. A vízszintes szaggatott vonal fölötti ($n_m > n_f = 1,66$) tartományban a lencse magja gyűjtőlencseként működik, mivel a törésmutatója nagyobb az öt körülvevő kalcit törésmutatójánál. Következésképpen, a lencse középső tartományának (ahol a magnak hatása van a fényútra) a fókusz tartománya közelebb lesz a lencséhez, mint a széli részek fókusz tartománya. Ehhez hasonlóan, a 9. ábrán a vízszintes szaggatott vonal alatti ($n_m < n_f = 1,66$) tartományban a központi mag szórólencseként működik, és így a lencse közepének fókusz tartománya távolabb csúszik a lencsétől.

A 9. ábrán egy vízszintes vonalon mozogva az n_a változik, míg az n_m állandó marad. Például a G_1 pontból a $G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, B_1, B_2$ és G_{13} pontokon át a B_3 felé haladva a lencse közepének fókusz távolsága gyakorlatilag változatlanul a lencse aljának közelében marad, a lencse szélének fókusz távolsága viszont változik: a G_1 pontban a lencse széle által fókuszált fény i relatív intenzitásának $l \approx 1,4$ -nél van csúcsa és $l \approx 9$ -nél i nullára cseng le. A G_2, G_3, G_4, G_5 , és G_6 pontokon áthaladva az intenzitáscsúcs távolodik a lencsétől, i lecsengésének távolsága pedig közeledik a lencséhez. A G_6 és B_1 pontok között megjelenik egy harmadik intenzitáscsúcs is (9. ábra). Ekkor tehát egy háromfókuszú (trifokális) lencsével van dolgunk. Az n_a további növelésével a lencse széle által létrehozott két intenzitáscsúcs még közelebb kerül egymáshoz, majd teljesen összeolvad G_{13} -ban, ahol ismét bifokális lencséről beszélhetünk. n_a még további növelésével újra trifokálissá válik a lencse.

A 9. ábrán függőlegesen mozogva az n_m változik állandó n_a mellett. Például az R_{13} pontban a lencse mag szórólencseként viselkedik. Mivel az $i(l)$ görbét csak az $l < 14$ tartományban vettük föl, a lencse közepe által létrejövő intenzitáscsúcsot nem tudjuk fölismerni, mert végtelen távolból közeledik, amint n_m nő. Az az állapot, ahol már bejön a képbe ez a csúcs, az R_{13} és G_{33} pontok között található. E határ jelképezi tehát a 9. ábrán azt, amikor már kezd megjelenni az $l < 14$ tartományban a lencse központi részének fókusz tartománya. Teljesen hasonló igaz a G_{21} és G_{20} pontok fölötti, az R_{15} és R_{16} fölötti és a G_{19} fölötti határra is. Ezek a pontok mind egy görbén fekszenek és mindegyikük a lencse közepe által létrehozott intenzitáscsúcs fölismérhetőségének korlátairól árulkodik. E



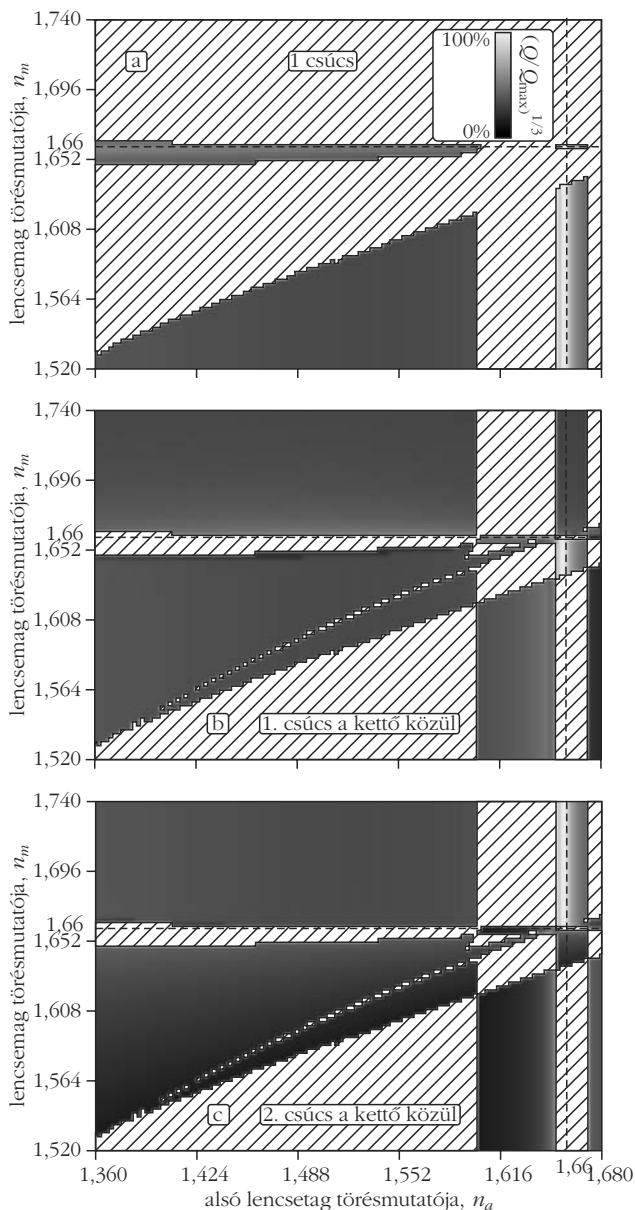
9. ábra. A téglalap oldalai mentén húzódó koordináta-tengelyek az alsó lencsetag n_a és a lencse mag n_m törésmutatóihoz tartoznak. A koordináta-rendszer minden pontja egy (n_a, n_m) paraméterpárt képvisel. A kicsi négyzetek a 6., 7. és 8. ábrákon látható görbékhez tartozó (n_a, n_m) törésmutatók elhelyezkedését szemléltetik. A különböző szürke árnyalatok (fekete, szürke, fehér) és címkék (R, G, B) az $i(l)$ relatív intenzitásgörbék csúcsainak számát (1, 2, 3) kódolják. A függőleges és vízszintes szaggatott vonalak az $n_a = 1,66$, illetve $n_m = 1,66$ törésmutatót mutatják. A szaggatott szürke görbe azt a határesetet jelzi, mikor a lencsétől legtávolabbi fókuszpont fölismérhetővé válik (távolsága kisebb mint $14R$, ahol R a lencse sugara).

határ fölött található a 9. ábrán egy keskeny sáv egy más szürke árnyalatú tartományba ágyazódva. Itt az történik, hogy a távolból a lencséhez közeledő fókusz tartomány eléri azt a részt, ahol lecseng a lencse szélének fókusz tartománya és ekkor a számítógépes algoritmus 3 intenzitáscsúcsot is találhat. Ha azonban a csúcs éppen ráesik e lecsengési részre, akkor 2 markánsabb csúcs alakul ki a G_{36} pontban. Az n_m -et tovább növelve a lencse mag az R_5 pontban lényegében eltűnik, mert a törésmutatója eléri a kalcit 1,66 törésmutatóját. Itt a lencse egyfókuszú. A 9. ábrán tovább mozogva fölfelé a fókusz tartomány kettéválik és a G_{11} és G_5 pontokon áthaladva a lencse közepének fókusz tartománya egyre közelebb kerül a lencséhez.

A 9. ábráról további információkat is leolvashatunk: (i) ha $n_m < n_f$ akkor a trilobalencse bifokális, viszont a $\Delta n = n_f - n_m$ különbség kicsi kell hogy legyen ($< 0,1$), mert nagy Δn esetén a lencse mag túlzott mértékben szétszórná a fénysugarakat, nagyon eltávolítaná a lencsétől a mag fókusz tartományát, akár a végtelenbe is. (ii) Ha $n_m = n_f$ akkor a lencse általában egy éles fókuszponttal rendelkezik, különösen a 9. ábra R_7 pontjában. Egyedül akkor kapunk bifokális lencsét, ha $1,6000 < n_a < 1,6525$. (iii) Ha $n_m > n_f$ akkor a lencse bifokális.

A 10. ábrán az intenzitáscsúcsok Q élessége, vagyis a fókuszpontok gömbi hibára való korrekciójának mértéke látható az n_a és n_m törésmutatók függvényében egy (10.a ábra), kettő (10.b ábra), illetve három (10.c ábra) fókusz esetén.¹ Ha Q kicsi vagy nagy, akkor a fókusz rendre gyengén vagy jól korrigált a gömbi hibára. A 10.a ábra szerint, amikor monofoká-

¹ Lásd cikkünk I. részében a (15) és (16) definíciókat.



10. ábra. A fókuszpontok Q élessége [lásd cikkünk I. részében a (15) és (16) definíciókat] az alsó lencsetag n_a és a lencsemag n_m törésmutatójának függvényében. (a) Az egyfókuszú tartományokban (a 9. ábrán fekete területek) adódó $Q(n_a, n_m)$ élességek. (b) A kétfókuszú lencse esetén (a 9. ábrán fehér területek) a lencséhez közelebb eső fókuszhoz tartozó $Q(n_a, n_m)$ élességek. (c) A kétfókuszú lencse esetén a lencsétől távolabbi fókuszhoz tartozó $Q(n_a, n_m)$ élességek. Minél sötétebb egy adott pont, annál kisebb a hozzá tartozó Q érték. Az ábra a $q = (Q/Q_{\max})^{1/3}$ értékeket kódolja szürke-árnyalatosan $Q_{\max} = 3096223$ mellett (fekete: $Q = 0$, $q = 0\%$; fehér: $Q = Q_{\max}$, $q = 100\%$). Az (a) ábrán a csíkos területek a 2 vagy 3 fókuszú lencségeket jelzik (a 9. ábrán fehér vagy szürke tartományok). A (b) ábrán a 3 vagy 1 fókuszú lencsékhez tartozó területeket jelöli a csíkozás (a 4. ábrán szürke vagy fekete tartományok).

lis lencséről van szó, $n_a = 1,655$ és $n_m = 1,66$ eredményezi a legnagyobb Q élességet. Ez azt jelenti, hogy nincs is mag a lencsében, és az alsó lencsetag törésmutatója picivel kisebb, mint a felső lencsetagé. A 10.b ábrán a legvilágosabb terület az $n_m = 1,66$ és $n_a = 1,66$ törésmutatókat jelképező vízszintes és függőleges szaggatott vonalak metszéspontja alatt helyezkedik el, viszont ugyanez a terület egészen sötét a

10.c ábrán. A 10.c ábrán világosan látszik, hogy a legnagyobb Q élességeket az előbb említett metszéspont fölött találjuk, azonban a 10.b ábrán itt kicsi Q értékekkel találkozunk. Egy jól használható bifokális lencsénél mindkét fókusztartománynak élesnek kell lennie hasonló Q élességekkel. Az $n_m = 1,66$ vonal fölött és alatt n_a viszonylag kis értékeinél (például 1,40) a két intenzitáscsúcshoz tartozó Q szinte azonos, ami azt jelenti, hogy mindkét fókuszt nagyon hasonlóan használható képalkotásra.

Végeztünk sugárkövetést nem az optikai tengellyel párhuzamosan beeső fénysugarakkal is $n_m = 1,64$ és $n_m = n_a = 1,66$ értékek mellett. Az utóbbi a mag nélküli trilobitalencse esete. A sugármenetekből nyilvánvalóan látszott, hogy amint növeljük a beeső nyaláb optikai tengellyel bezárt θ szögét, úgy romlik rohamosan a lencse fókusztávolsága a fókusztartományok elmosódásával. A *Perga* darázs lárvájában található kéttagú lencsére számolt sugármenetekhez [21] hasonló eredményt adott az általunk vizsgált trilobitalencse is.

Az eredmények elemzése

Hogy megértsük a *Dalmanites* trilobitafaj összetett szemében található lencsék központi magjának optikai szerepét, számítógépes sugárkövetést végeztünk egy ahhoz hasonló lencsén, amelynek alakját korábban rekonstruálták [8]. A maggal rendelkező lencse felső tagja optikailag homogén kalcitból állt, aminek törésmutatója 1,66 [8]. Bár a lencsemag és az alsó lencsetag eredeti anyaga ismeretlen, az elektronmikroszkópos és hagyományos optikai felvételeken való homogén megjelenéséből arra következtethetünk, hogy eredetileg is optikailag homogén anyagokból állhattak [22].

A trilobita-látás irodalmában [22] a legegyszerűbb modell szerint a lencse felső tagja homogén kalcitból (ami a megkövülés során fennmaradt, ezért kimutatható, hogy a kristálytani c tengely egybeesett az optikai tengellyel), az alsó lencsetag pedig valamilyen szerves homogén anyagból, például hidratált kitinből állt, aminek törésmutatója 1,40 és 1,53 közötti érték volt. Habár a lencsemag hajdani anyaga ismeretlen, homogén maradványának kinézetéből feltételezhető, hogy eredetileg ez is optikailag homogén lehetett. Vizsgálataink [19] képviselik az első próbálkozást a lencsemag jelentőségének magyarázatára.

A több száz millió éves fosszilizáció miatt a lencsében elhelyezkedő mag eredeti összetétele ismeretlen. A hosszú megkövesedési folyamat során a lencseanyag lebomlott és ásványi anyagok kerültek a helyére. A lencsemagnak mindössze az alakja maradt fenn, ami a lencséből készült metszeteken jól kivehető [8]. Ugyanez elmondható az alsó lencsetagról is. Következésképpen, a lencsemag és az alsó lencsetag anyagának törésmutatóját megmérni lehetetlen. Az egyetlen lehetőség, hogy felállítunk egy optikai modellt és sugárkövetéssel tanulmányozzuk. Kézenfekvő volt a legegyszerűbb modelltől indulni: feltételeztük, hogy mindhárom lencsetag (felső és alsó lencsetag, köz-

ponti mag) optikailag homogén volt, térben állandó törésmutatóval. Megmutattuk, hogy az alsó lencsetag és a lencsemag törésmutatójától függően a szóban forgó trilobitalencse gömbi hibára korrigált egy-, két-, illetve háromfókuszú lencseként működhetett. A trifokalitást, mint lehetőséget elvetettük, mivel egy háromfókuszú lencse már inkább hátrányos, mint előnyös, ha bármely állat látásában játszik szerepet, viszont a bifokális, illetve monofokális megoldást elképzelhetőnek tartjuk. Tehát az az egyszerű föltevés, miszerint mindhárom lencsetag optikailag homogén volt, megállja a helyét. Ha a sugárkövetések végeredményei azt mutatnák, hogy egy ilyen homogén elemekből álló háromtagú lencse nem működhetett, akkor lenne értelme bonyolultabb modelleket felállítani és vizsgálni. Egy ilyen modellben például a törésmutatót lehetne helyfüggőnek tekinteni, mint ahogyan az számos rovarfaj szemlencséjére jellemző [23].

Az i relatív intenzitáseloszlást vizsgáltuk az optikai tengelyen az alsó lencsetag n_a és a lencsemag n_m törésmutatójának függvényében. Meghatároztuk azon törésmutató-értékeket, amelyek a vizsgált trilobitalencsét egy-, két-, illetve háromfókuszúvá teszik (9. ábra). A lencsemag kinézete egyértelműen mutatja, hogy más szerkezeti és optikai tulajdonságokkal bír, mint a felső lencsetag, így valószínűleg a törésmutatója is más volt. Annak a lehetőségét korábbi tanulmányok [8] kizárták, hogy a lencsemag nem létezett, amikor a trilobita még élt, és csak később, a megkövesedés során jelent meg a központi mag a lencsében.

Jelen eredményeink alapján kijelenthetjük, hogy a szóban forgó szilur kori *Dalmanites* trilobitafaj szemlencséjében található központi mag szerepe a gömbi hiba korrigálása lehetett a fókuszpontok számától (1, 2 vagy 3) függetlenül. A számításaink eredményeiként adódó $i(D)$ görbék intenzitáscsúcsai meglehetősen változatosak (6–8. ábrák).

Azokra a törésmutatókra, amelyeket a 9. ábra fehér tartományai képviselnek, a trilobitalencse bifokális. Tehát egy másik lehetséges szerepe a magnak az volt, hogy a lencse bifokalitását tette lehetővé. A lencse széli részének ilyenkor egy jól meghatározott távolságban van a fókuszpontja, a középső résznek pedig attól függően kisebb vagy nagyobb lesz a fókusz távolsága, hogy nagyobb vagy kisebb a lencsemag törésmutatója, mint az őt körülvevő kalcit. A kalcit 1,66 törésmutatója igen nagy, jóval nagyobb mint a szerves anyagoké: például a kitinnek 1,45 és 1,56 között változik a törésmutatója a hidratációs foktól függően [24, 25]. Véleményünk szerint a lencsemag törésmutatója

nem volt nagyobb a kalciténál. Ha kisebb volt, akkor a lencse közepének fókusz távolsága nagyobb volt, mint a széli részeké (7. ábra). Annál nagyobb lehetett a két fókusz távolság közötti különbség, minél kisebb volt a lencsemag törésmutatója.

A trilobitalencsék bifokalitásának jelentőségére Gál és társai [12, 26] mutattak rá. Két ízben is kimutatták a trilobitaszemek e tulajdonságát. Megmutatták, hogy a schizochroális szemlencsés *Dalmanites socialis* trilobita egyszerre volt képes közeli (például apró, lebegő tárgyak, kicsi szákmányállatok) és távoli (például tengerfenék, fajtársak, ragadozók) tárgyakat élesen látni, mert bifokális szemlencsével rendelkezett. A retinának ehhez a lencse távolabbi fókusz síkjában kellett elhelyezkednie, amit a lencse széli részei hoztak létre. A *Dalmanites socialis* felső lencsetagjának alsó felületén egy apró dudor volt, amin jobban megtörték a fénysugarak, ezért ez a középső tartomány egy második, a lencséhez közelebb lévő fókuszpontot hozott létre.

E korábbi eredmények szerint [12] az általunk vizsgált szilur kori *Dalmanites* trilobita retinája a szemlencse középső részéhez tartozó fókusz távolságban kellett hogy elhelyezkedjen. Ekkor az állat egyszerre láthatott élesen közeli és távoli tárgyakat, rendre a lencse széli, illetve középső tartományaival. Tehát a *Dalmanites* szemlencséjének belső és széli tartományainak szerepe éppen fordítottja lehetett a *Dalmanites* szemlencséje megfelelő részeinek.

Kettőnél több fókuszpont már túl sok lenne egy összetett szem lencséjének. Ekkor ugyanis túl bonyolulttá válna az alkotott kép, ráadásul túlságosan elmosódott lenne. Ezért a trifokalitást csak mint elméleti lehetőséget említjük, véleményünk szerint ilyen szemlencse nem működhetett jól.

Irodalom

21. Meyer-Rochow, V. B.: Structure and function of the larval eye of the sawfly, *Perga*. *Journal of Insect Physiology* 20 (1974) 1565–1591.
22. Clarkson, E. N. K.; Levi-Setti, R.; Horváth, G.: The eyes of trilobites: the oldest preserved visual system + Los ojos de los trilobites: el sistema visual más antiguo conservado (spanyolul) *Fundamental* 13 (2008) 1–70.
23. Land, M. F.; Nilsson, D.-E.: *Animal Eyes*. Oxford University Press, (2002) p. 221.
24. Hinton, H.; Jarman, G.: Physiological colour change in the *Hercules* beetle. *Nature* 238 (1972) 160–161.
25. Land, M. F.: The physics and biology of animal reflectors. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 24 (1972) 75–106.
26. Gál, J.; Horváth, G.; Clarkson, E. N. K.: Reconstruction of the shape and optics of the lenses in the abathochroal-eyed trilobite *Neocobboldia chinlinica*. *Historical Biology* 14 (2000) 193–204.



**Az Eötvös Társulat
főnt van a **facebook** -on!**



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

RÉTEGÉPÍTÉS ATOMI PONTOSSÁGGAL A MIKRO- ÉS NANOTECHNOLÓGIÁBAN

Baji Zsófia, MTA TTK MFA

Mikula Gergő János,* BME VBK, MTA TTK MFA

Az atomi rétegleválasztás (Atomic Layer Deposition – ALD) módszer egy kémiai rétegepítési eljárás, amely váltakozva végbemenő felületi reakciók sorozatából áll. A folyamat során a reagensek – prekursorok – felváltva, pulzusszerűen kerülnek a reaktortérbe, kemisorbeálódnak¹ a hordozó felületén, és ott reakcióba lépnek egymással. A nem kemisorbeálódott molekulák eltávolítására a reaktort a pulzusok között semleges gázzal tisztítják, ezért reagensek csak a hordozó felületén találkoznak, és atomi rétegenként építik fel a filmet.

Az ALD, vagy ahogy akkor hívták, az atomi réteg epitaxia (ALE) eljárás ötletét egy orosz kutatócsoport publikálta először az ötvenes években *Koltsov* és *Aleszkovszkij* professzorok vezetésével. A gyakorlati megvalósítás azonban 1974-ig váratott magára, amikor a finn *Tuomo Suntola* kutatócsoportjának sikerült elektrolumineszcens kijelzőkben² alkalmazható ZnS-réteget előállítani. Ezekhez nagy felületű és kiváló minőségű lumineszcens dielektrikum-filmeket kellett leválasztani, és ez abban az időben csak az ALD-módszerrel volt lehetséges. Ezután még a hetvenes években több különböző, az ipar számára is használható reaktorkonstrukcióval is előálltak. Eredetileg a módszert III-V és II-VI vegyület-félvezetők epitaxiás leválasztására tervezték, de nem terjedt el a megvalósítandó bonyolult felületi kémia miatt [1]. Ezen kívül a rétegnövekedés lassúsága is az elterjedés ellen szólt, de ahogy a félvezetőipar miniaturizálása elvezetett az atomi szinten kontrollált, 1-10 nm vastagságú vékonyréteg leválasztásának igényéhez, ez a hátrány előnyvé változott. Így az ALE újabb felhasználási lehetőségekre talált a félvezetőiparban. Mára a módszer számos különböző tulajdonságú film leválasztására vált alkalmazható: lehetőség nyílik fém-oxidok (például: Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO), fém-nitridek (például: TiN, WN), fém-szulfidok (például: ZnS) és bizonyos fémek elemi (például: Ru, Ir, Pt) vékonyrétegének kialakítására is. Ma már tucatnyi neves cég gyárt kísérleti és ipari ALD-berendezéseket.

A sokkal szabatosabb ALD elnevezés a kétezres évek elején terjedt el, ami elsősorban annak köszönhető, hogy az integrált áramkörök méretcsökkenése miatt ez a technológia meghatározó szerepet játszik

a kapuelektrodák és kapacitások szigetelő rétegének, valamint diffúziós gátak³ előállításában. A módszerrel készített vékonyrétegek többnyire nem egykristályosak, hanem amorf vagy mikrokristályos szerkezetűek.

Az ALD mechanizmusa

Az ALD-folyamat négy jól elkülönített lépésből áll, amelyek egymás utáni ciklikus ismétlődése során megy végbe a rétegepítés (*1. ábra*).

1. Az első, gáz halmazállapotú prekursor belép a vákuumtérbe és kemisorbeálódik a hordozó felületén. Az ALD-folyamat feltétele, hogy a felületen található hidroxil- vagy más felületi funkció csoporttal végbemenő kapcsolódás játszódjék le.

2. A nem kemisorbeálódott prekursormaradványokat tiszta, inert gáz (általában nitrogén) öblíti ki a reaktorból.

3. A felületen megkötött prekuzorral a következő lépésben beengedett reagens reakcióba lép.

4. Egy újabb öblítés eltávolítja az el nem reagált alapanyagokat valamint a melléktermékeket a rendszerből.

Egy ilyen ciklus eredménye elvben tehát egy atomi, illetve molekuláris réteg épülése a hordozó felületén. A módszer alapja, hogy csak a felület és az adszorbátum között tud erős kémiai kötés kialakulni, a prekursorok között a kötés gyenge. Ebből következően a réteg minden ciklusban ilyen mértékben vastagszik. A *2. ábrán* látható az ALD-vel növesztett vékonyréteg növekedési sebessége a leválasztási hőmérséklet függvényében. Látható, hogy egy adott hőmérséklet alatt nem kemisorpció, hanem kondenzáció⁴ történik, egy adott hőmérséklet felett pedig már nem kontrollálható a növekedés. Az ALD-ablak jellemzően 100–400 °C leválasztási hőmérséklet-tartományba esik.

Az ALD-vel kapcsolatos leggyakoribb tévhit, hogy a módszer eredményeképpen valóban pontos, atomi rétegenként növekvő filmet kapunk. Annak, hogy ez mégsem valósul meg, elméleti okai vannak. Az ALD

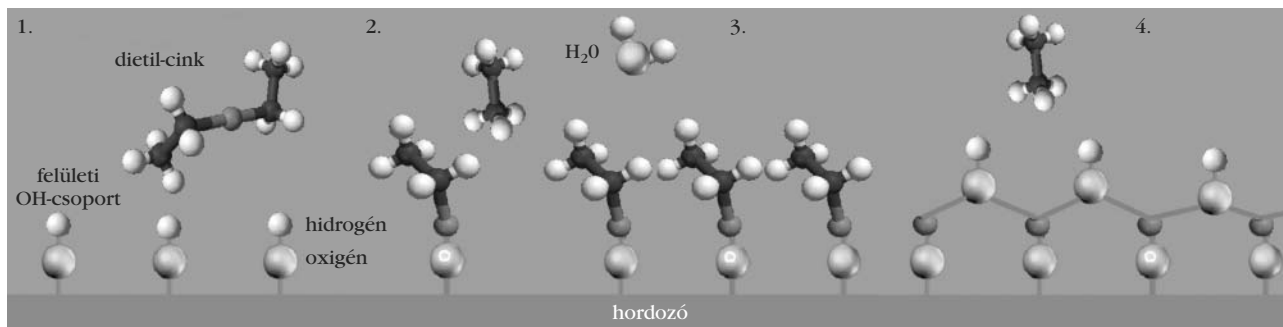
* egyetemi hallgató

¹ A *kemisorpció* az adszorpció egy fajtája, amikor a folyadékban vagy gázban található atomok, molekulák vagy ionok egy szilárd felületen kémiai reakció révén kötődnek meg.

² Az *elektrolumineszcencia* optikai-elektromos jelenség, amelynek során az anyag a rajta áthaladó áram vagy a rá ható elektromos tér hatására fényt bocsát ki. Ez a jelenség felhasználható kijelzők és fénytestek készítéséhez.

³ Valamely két anyag között kialakított *diffúziós gát* egy olyan réteg, ami meggátolja vagy hátráltatja az általa elválasztott komponensek diffúzióját.

⁴ A két jelenség közötti fontos eltérés, hogy kondenzáció esetén az azonos, kemisorpció esetén pedig az eltérő atomok, illetve molekulák kölcsönhatása jelenti a hajtóerőt. Egy felületen bármilyen, kritikus hőmérséklete alatti gáz kondenzálódhat, viszont a kemisorpcióhoz specifikus kölcsönhatások szükségesek a felület és a gáz molekulái között.



1. ábra. Az ALD mechanizmusa a ZnO növekedés példáján bemutatva.

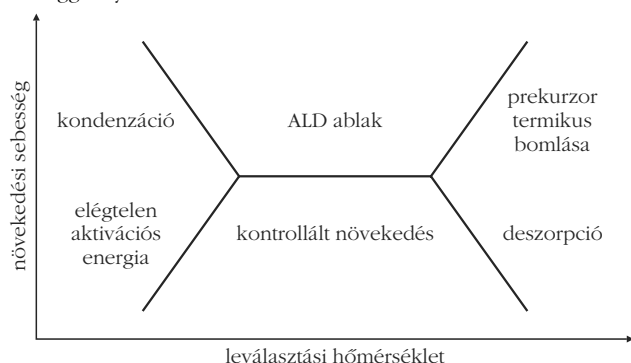
rétegleválasztás során kemiszorpció megy végbe, amelynek során az adszorbeálódott anyag mennyisége a reagens parciális nyomásától, az expozíciós időtől és a kötési helyek számától függ. Az úgynevezett „ALD-ablakon” belül a folyamat lezajlását az első két paraméter nem befolyásolja, így csak az adszorpció helyek sűrűsége a kérdéses tényező. Mivel a kemiszorpció csak adott kötési helyeken megy végbe, és ezek eloszlása nem ideális, továbbá a prekursor-molekulák nagy méretüknél fogva több kötőhelyet is lefedhetnek, ezért az ALD-módszerrel elérhető növekedési sebesség csak a legkritikább esetben egy atomi réteg ciklusonként [2]. A módszer alkalmas különböző anyagú rétegek egymásra leválasztására is, de az egyik anyag után a másik leválasztásakor az eltérő kemiszorpció tulajdonságok miatt az első néhány ciklusnál a növekedési sebesség kisebb lehet.

A módszer előnyei és hátrányai

Bár a leválasztási folyamat hőmérséklete erősen függ a hordozó és a reagensek anyagi minőségétől, azonban általánosan elmondható, hogy a leválasztás akár szobahőmérsékleten is végbemehet. Ekkor egyrészt elkerülhető a prekursorok gáztérbeli termikus bomlása, másrészt hőmérsékletre érzékeny anyagokon, például polimereken vagy biológiai mintákon is lehet vékonyréteget kialakítani.

A módszer másik nagy előnye, hogy kontrollált módon növeszthető egyenletes réteg strukturált, nem

2. ábra. A növekedési sebesség ábrázolása a leválasztási hőmérséklet függvényében.



sík hordozókra (például összetett 3D szerkezeteken vagy pórusos felszíneken, árkok, üregek falán) is. Ehhez azonban az adott folyamat mechanizmusának figyelembe vétele mellett a leválasztási paraméterek körültekintő beállítása, például az egyes perkurzor és öblítő lépések (pulzusok) hosszának optimalizálása is szükséges. Az ALD-módszer rendkívül előnyös, hiszen így összetettebb nanométeres struktúrák kialakítását is lehetővé teszi.

Az egyes reagensek bevitele a reaktortérbe pulzuszerű és időben elválik egymástól, így ezzel a módszerrel adalékolt félvezetők, többretegű rendszerek, vagy akár réteg vastagsága mentén változó összetételű filmek is kialakíthatóak.

Megfelelő technológiai körülmények között ALD-technikával tetszőlegesen nagy felületen alakíthatók ki rétegek, egyszerre akár több hordozón is, így a hordozó méretének növelése az ipari alkalmazásokban nem jelent akadályt.

Az ALD megvalósítása – berendezések

A legtöbb ALD-reaktor csökkentett nyomáson működik. Több különböző ALD reaktorgeometria létezik. Az egyik típusnál a reagensek vívógáz nélkül kerülnek a kamrába, majd az adszorpciót követően azokat vákuumszivattyú távolítja el a rendszerből. Ez a módszer jól kihasználja a reaktorba juttatott prekursor mennyiséget, viszont vívó- és öblítőgáz híján nagyon sokáig tart a reagens feleslegének kiürítése.

Másik fajtája az átáramlásos reaktor, amelyben a reagenseket valamilyen vívógáz szállítja, folyamatos áramlással öblítve a reaktorteret. A nagy gőznyomású reagensek egyszerűen adagolhatók a vívógázba. Szilárd vagy folyékony forrás esetén a vívógáz átáramlik a forrás fölött vagy – alacsony gőznyomású folyadékok esetén – rajta keresztül és telítődve magával viszi a reagenseket, majd később a reakciótermékeket is. Ez a típus gyors gázimpulzusokat és öblítést, ezáltal rövid ciklusidőt tesz lehetővé. Az átáramlásos reaktorokban a jellemző nyomás 1-10 mbar közötti, ami korlátozza a rétegpülési folyamat monitorozását.

Az ALD legegyszerűbb válfaja a termikus ALD, ahol a prekursorok fűtött hordozóra válnak ki és a folyamat létrejöttéhez szükséges energiát csak a hőközlés adja. A nagyobb energiaigényű reakciók létrejöttéhez

(például elemi fémek leválasztásához) szükséges energiát rádiófrekvenciás plazmás gerjesztéssel,⁵ vagy szabad gyökök pirolízises⁶ létrehozásával közlik a rendszerrel. Az így létrejött hidrogéngyökökkel lehetséges a fém- vagy félvezető-prekursorok redukálása [3]. Ilyen módon sikerült szén-, szilícium- és germániumrétegeket is növeszteni. A módszer hátránya viszont, hogy mély és szűk árkok falán rekombinálnak a hidrogéngyökök, így az árkok alja felé haladva csökken a gyökök fluxusa és a réteg ezeken a területeken egyáltalán nem alakul ki vagy vékonyabb lesz a felszínen találhatóhoz képest.

Prekursorok

Az ALD prekursorai lehetnek gáz, cseppfolyós vagy akár szilárd halmazállapotúak is. Természetesen minden esetben illékonyak és termikusan stabilnak kell lenniük, illetve végbe kell mennie a kemisorpciónak is, tehát erősen kell reagálniuk a felülettel vagy annak valamelyik funkciós csoportjával és egymással is.

A fenti feltételeknek eleget tevő prekursorok anyagi minőségük szerint lehetnek szervetlen és fémorganikus⁷ vegyületek. A használt szervetlen anyagok jellemzően hidrogéntartalmúak (például víz, kén-hidrogén, ammónia) és kellően illékonyak is. Az említett vegyületeken kívül használhatnak például az erősebb oxidáló hatás érdekében ózont vagy hidrogén-peroxidot is. A fémtartalmú reagensek jellemzően fémorganikusak, általában fém-alkil és -alkoxid⁸ típusú vegyületek. Számos esetben tanulmányoztak fém-halogenideket, főleg kloridokat is. Bár a legtöbb fém esetén rendelkezésre áll a feltételeknek megfelelő prekursor, de az alkáli és alkáli földfémek esetében a megfelelő prekursorok előállításuk önmagában is problémát jelent. A kutatások ezen fémek vegyületeinek rétegleválasztásához a β -diketon-komplexek⁹ használata felé irányulnak. Sikeresen választottak le ilyen típusú prekursorok használatával magnézium-oxid és indium-szulfid filmeket is.

Illékonyág és technológia szempontjából három kategóriát különböztethetünk meg: az első esetben a prekursorot fűteni kell a megfelelő gőznyomás eléréséhez; második esetben a prekursor megfelelő gőznyomású szobahőmérsékleten – ez főleg fémorganikus vegyületekre jellemző; a harmadik esetben a gőznyo-

⁵ Rádiófrekvenciás gerjesztés esetén egy nagy frekvenciával változó elektromos tér hatására jönnek létre a gyökök.

⁶ Pirolízis: molekulák bontása hőközléssel.

⁷ A fémorganikus vegyületek molekulái fématomokból és hozzájuk kapcsolódó szerves csoportból állnak.

⁸ Az alkilcsoport egy olyan kapcsolódó funkciós csoport, amit szén- és hidrogénatomok alkotnak, amelyeket csak egyszeres kötések kötnek össze. Alkoxicsoporthoz akkor beszélhetünk, ha az alkilcsoport egy oxigénatom révén kapcsolódik a központi atomhoz.

⁹ A szerves kémiában ketonoknak nevezzük az $RC(=O)R'$ képlettel leírható vegyületeket, ahol R és R' valamilyen széntartalmú szubsztituens. Egy ilyen molekulában a $C(=O)$ csoport a ketocsoport. A β -diketonok esetén a molekulában két ketocsoport található, amiket egy szénatom választ el egymástól.

más túl nagy. Ilyenkor a tömegáram, azaz az időegység alatt bejuttatott anyag mennyiségének pontos szabályozása jelenti a megoldást.

A nukleáció kérdése az ALD-nél

Az ALD-nél az új fázis kialakulásának első lépése a magképződés (nukleáció), amely meghatározó a folytonos, ultravékony rétegek növekedésében. Mivel az atomi rétegleválasztás alapja a kémiai reakció, a felületi funkciós csoportok mennyisége jelentős paraméter. Ezek jelentik ugyanis a nukleációs helyeket, amelyeken megindulhat a kívánt réteg kialakulása. Például oxidfelületeken a fém-oxidok és -nitridek folytonosan kezdenek el nőni, ugyanis a felületen található hidroxilcsoportok könnyen reakcióba lépnek a fémorganikus prekursorokkal. Amennyiben a felület túl inert, vagy a prekursorok kemisorpciója nem elég hatékony, akkor a leválasztás esetleg egyáltalán nem is lehetséges. Ha a funkciós csoportok eloszlása vagy mennyisége nem megfelelő, a prekursorok a Volmer-Weber-mechanizmusnak megfelelően szigeteket hoznak létre. Ez csökkenti a leválasztás kezdeti szakaszában a rétegnövekedés ütemét, bár több ciklust követően a szigetek összenőnek és folytonos filmet alakítanak ki.

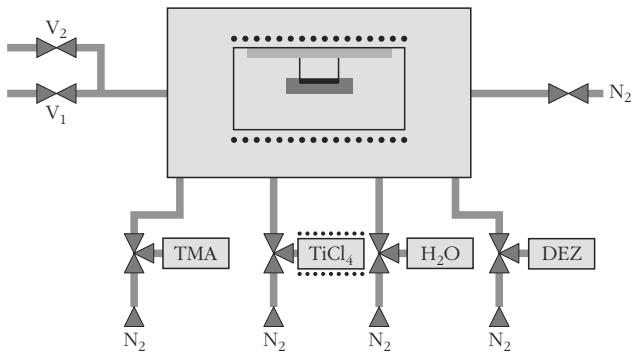
A megfelelő nukleáció hiánya jellegzetes az ultravékony dielektrikum-rétegek növesztésénél, például a nagy dielektromos állandójú kapuoxidok¹⁰ esetében. Ezeknek egyszerre kell igen vékonyak és homogének lenniük, hogy kellően egyenletes elektromos tér alakuljon ki a teljes oxidrétegben. A fém-oxidok ALD-növesztésénél a hidrogénpasszívált¹¹ Si(100) felületen a nukleáció nem megfelelő, emiatt a nagy dielektromos állandójú kapuoxidok növesztése az ALD egyik legnagyobb kihívása.

Fémek ALD-leválasztása oxidfelületeken szintén nehézségekbe ütközik. Ez alapvetően nem meglepő, hiszen a fémek általában nem nedvesítik az oxidfelületeket, hanem inkább egymástól különálló halmazokat, klasztereket képeznek rajtuk. Ezen kívül igen nehezen megy végbe a magképződés különböző inert anyagok, mint az igen perspektivikus szén nanocsövek és a grafén felületén is. A grafénnel kapcsolatban egyébként is általános igazság, hogy inertsége miatt a prekursorok nem képesek a kemisorpcióhoz szükséges reakcióra. Megfigyelések szerint inkább csak a lépcsők, hibahelyek mentén tudnak nanométeres csíkokban nőni a rétegek. Tiszta grafénfelületen sikeresen választottak le ALD-filmet jól fizisorbealódó¹²

¹⁰ A fém-oxid félvezető tervezérlésű tranzisztor (angolul röviden MOSFET) kapuelektrodját a *gate oxid* réteg választja el a töltésáramlás helyéül szolgáló csatornától.

¹¹ Hidrogén passzívált szilícium készítésekor a natív szilícium-oxidot hidrogén-fluorid vizes oldatával lemarják, így a tiszta felszínen a szilíciumatomokhoz hidrogénatomok kapcsolódnak.

¹² A fizisorpció (fizikai adszorpció) a kemisorpció mellett az adszorpció másik esete. Ebben az esetben nem alakul ki elsődleges kémiai kötés, a jellemző kölcsönhatás a van der Waals-erő.



3. ábra. A Picosun R-100 berendezés sematikus képe.

gáz – ózon vagy nitrogén-dioxid – segítségével is, amely nukleációs helyként szolgál a prekursorok számára [3].

A módszer alkalmazási területei

Az ALD egyik legfontosabb alkalmazási területe a mikrotechnológiában a nagy dielektrikus állandójú kapu-dielektrikumok növesztése. Az ALD-reaktor viszonylag alacsony üzemi hőmérséklete miatt előnyös, hogy csökken a rétegek közti káros diffúzió.

Az alacsony hőmérsékletű leválasztásnak köszönhetően olyan anyagokat is bevonhatunk, amiket korábban a termikus bomlás miatt nem sikerülhetett, ilyenek például a polimer- vagy a biológiai eredetű minták. Így lehetővé válik szerves-szerveetlen polimerkompozitok¹³ készítése és igen fontos ez az eljárás a flexibilis hordozójú elektronika vagy az organikus napelemek készítésénél is.

Az ALD legérdekesebb tulajdonsága viszont az a pontosság, amivel leképezi a hordozó felületét. Így egészen mély árkokat, polimergolyókat, bonyolultabb struktúrákat is kontrollált módon lehet bevonni. Különösen látványos eredmény a 3D fotonikus kristályok, inverz opálok¹⁴ készítése, amelynek során polisztirolgolyókat vontak be ALD-vel, majd a golyók kémiai eltávolítása után szabadon álló, belül üreges félgömbök maradtak a felületen [4].

Az MTA TTK MFA-ban folyó kísérletek

Az MTA TTK MFA Mikrotechnológiai Laboratóriumában egy finn Picosun SUNALE™ R-100 típusú atomi rétegleválasztó berendezés üzemel. A berendezés egy átáramlásos termikus ALD-reaktor, amiben egy 100 mm átmérőjű mintatartó helyezkedik el (3. ábra).

Négy prekursorforrásnak alakítottak ki helyet, jelenleg a berendezésben dietil-cink $[Zn(C_2H_5)_2]$, trimetil-alumínium $[Al(CH_3)_3]$, titán-izopropoxid $[Ti(OC_3H_7)_4]$ és

¹³ Kompozit: két vagy több komponens valamilyen társítása, aminek során azok előnyös tulajdonságai érvényesülnek.

¹⁴ Az inverz opálok szabályosan elrendeződő gömb formájú üregeket elválasztó anyagból állnak. Ez a struktúra szerkezeti optikai viselkedést mutat.

$Ga_2(NMe_2)_6$ prekursorok vannak, oxidánsként vízgőzt használunk, így cink-oxid, alumínium-oxid, titán-dioxid és gallium-oxid rétegek növesztésére van lehetőség. Öblítő- és vivőgázként 99,999%-os tisztaságú nitrogént használunk.

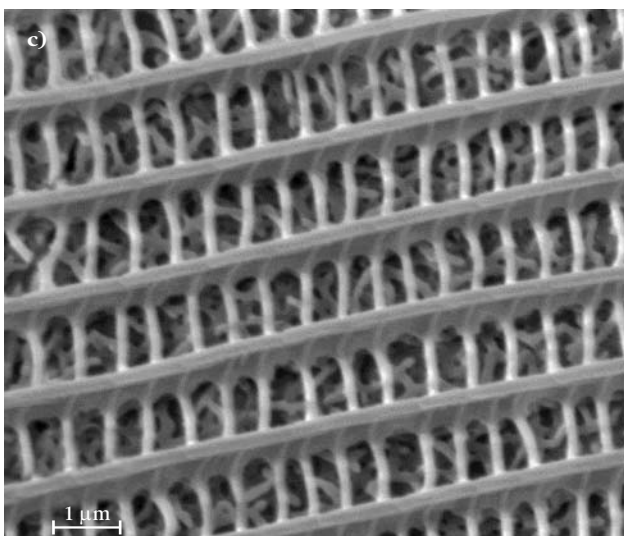
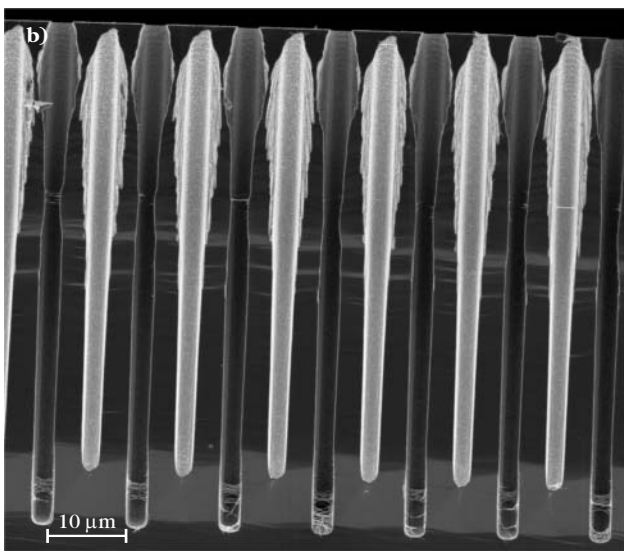
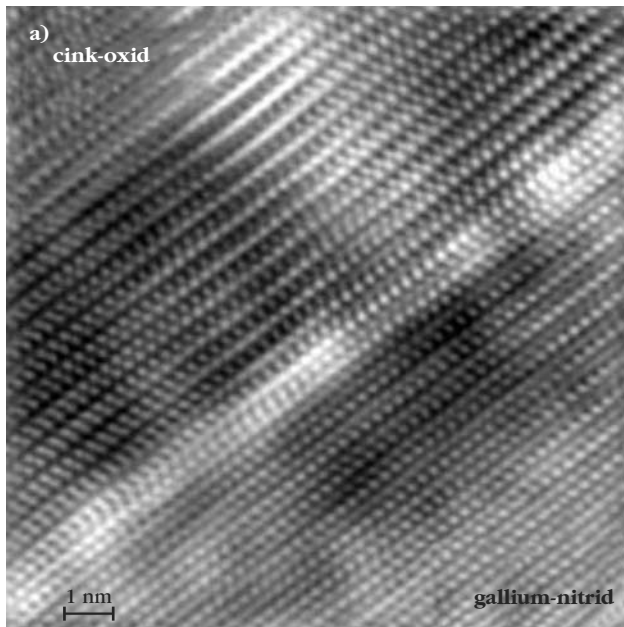
Az MFA-ban folyó kutatások elsősorban ZnO-ra fókuszálnak. Ez a széles tiltott sávú n-típusú félvezető különösen fontos napelemkutatásokhoz, mint átlátszó vezető elektróda. Az atomi rétegleválasztással készült ZnO vezetési és optikai tulajdonságai, valamint morfológiája is pontosan beállítható alumíniumadalékolással és a leválasztási hőmérséklet helyes megválasztásával. A rétegek fajlagos ellenállása $10^{-4} \Omega cm$ és $10^3 \Omega cm$ között tetszés szerint változtatható.

Optoelektronikai (fényt kibocsátó eszközök) alkalmazásokhoz nagy szükség van jó minőségű epitaxiális ZnO vékonyrétegekre, amelyek elektromos tulajdonságai is meghatározhatók. Atom rétegleválasztással készíthetők epitaxiális rétegek GaN (4.a ábra) és ScAlMgO hordozókra, de zaffron és szilíciumon is igen jó minőségű orientált polikristályos rétegeket sikerült létrehozni. Ezen kívül a GaN hordozókon a rétegek vezetőképessége is igen nagy, ami egyrészt a kiváló kristályszerkezetből fakadó igen nagy töltéshordozó-mozgékony-ságnak köszönhető, másrészt a leválasztás során a rétegbe diffundáló Ga-atomok miatt a töltéshordozó-koncentráció is nagyon magas.

A nagy fajlagos felületű struktúrák bevonása intézetünk több kutatási témájánál is előkerült. Különböző érzékelők előállítására vonatkozó kísérleteinkben 50 nm cink-oxiddal vontunk be szilíciumba mart 50 μm mély és 2 μm széles árkokat (4.b ábra), amelyekre utólag nedves kémiai eljárással cink-oxid nanorudakat növesztettünk. A kísérletekből látszik, hogy a berendezés az ALD-től várható kiváló hatásokkal, teljes mélységében bevonta az árkok belső felületét. A ZnO nanorudak szerkezetét nagyban befolyásolta a cink-oxid alapréteg, például a rudak növekedésének irányát meghatározza a réteg kristálytani iránya.

Egy másik nehezen kezelhető, nagy fajlagos felületű struktúra a pórusos szilícium (olyan szilíciumból álló struktúra, ami különféle méretű pórusokat tartalmaz és igen nagy fajlagos belső felülettel bír), amely belső felületeinek egyenletes bevonására más módszer nem alkalmas. Kísérleteink során mezopórusos (~50 nm pórusméret) szilíciumot „béléltünk ki” 5 nm vezető ZnO-dal úgy, hogy a pórusok belsejében még maradjon hely a további összetevőknek.

Intézetünk Nanoszerkezetek Osztálya megkeresésére biológiai eredetű hordozóra, nevezetesen a *Polyommatus icarus* és a *Morpho aega* lepkefajok szárnyára választottunk le sikeresen alumínium-oxid vékonyréteget. E fajok szárnyait alkotó pikkelyek struktúrája természetes fotonikus kristály, ez a szerkezet határozza meg intenzív kék színüket. A szárnyat fedő pikkelyeket alkotó kitin igen összetett, bonyolult pórusrendszert alkot, amelynek bevonása egyenletes réteggel atomi rétegleválasztással vált megvalósíthatóvá. Emellett viszonylag alacsony hőmérsékleten, 100 °C-on végeztük el a műveletet, hogy a biológiai eredetű hordozó ne roncsolódjék (4.c ábra).



4. ábra. a) epitaxiás ZnO réteg GaN hordozón, b) DRIE mart árkok ZnO vékonyréteggel bevonva, c) ALD Al₂O₃-mal bevont *Polyimide icarus* lepkefaj pikkelye.

Mint fentebb említettük, néhány nm vastag vékonyrétegeknél igen fontos a kezdeti nukleáció kérdése. Ez a probléma áll fenn Si- és üveghordozók felületén növesztett cink-oxid filmek esetében is. A szakirodalom alapján a dietil-cinkkel és vízzel végrehajtott leválasztás esetén az első ciklusokban a kölcsönhatási helyeket a szilíciumatomokhoz kötődő hidroxilcsoportok, a szilanolok jelentik [5]. Kísérleteink központjában a hordozó felületmódosítása áll. Ehhez elsősorban levegő, illetve oxigénplazmát, UV-besugárzást és különböző kémiai módszereket alkalmazunk. A leválasztás 150-250°C-on megy végbe viszonylag kis ciklusszám mellett (5-10 ciklus). Az így elkészített minták morfológiáját atomerő-mikroszkóppal (atomic force microscope – AFM) vizsgáljuk, a felületi összetételt pedig elektronsugaras mikroanalízissel.

Összefoglalás

Az atomi rétegleválasztás, mint kémiai vékonyréteg-előállítási módszer viszonylag új keletű technológia, amit már napjainkban is alkalmaznak a korszerű mikrotechnológiában a nagy integráltságú mikroáramkörök gyártásában. Fejlődésével, térnyerésével választ ad a mikroelektronikai iparra jellemző miniatürizálás iránti igényre. A módszer alkalmas a ma megszokott nagy szeletméretek (például 300 mm átmérőjű szilícium!) kezelésére is, mert méretnövelés szempontjából meglehetősen jól viselkedő rendszerről van szó. Így – megfelelő paraméterek mellett – ipari méretű reaktorok is építhetők. Természetesen az ezúton kialakított filmeket nemcsak az elektronikai ipar alkalmazhatja, felhasználhatók atomi vékonyságú fotokatalitikus¹⁵ és más, felületi tulajdonságokat módosító bevonatok előállítására is.

Bár a módszer a többi kémiai rétegleválasztáshoz hasonló, a fő különbség az atomi rétegenként való építkezés, és ez teszi mind kutatási, mind technológiai szempontból érdekessé az atomi rétegleválasztás módszerét.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket nyilvánítják ki az elektronmikroszkópos képekért *Pécz Bélának*, *Tóth Attila Lajosnak* és *Vértesy Zofijának*.

Irodalom

1. T. Suntola: Atomic Layer Epitaxy. *Materials Science Reports* 4 (1989) 261–312.
2. T. Suntola: Surface Chemistry of Materials Deposition at Atomic Layer Level. *Applied Surface Science* 100/101 (1996) 391–398.
3. S. M. George: Atomic Layer Deposition: an Overview. *Chemical Reviews* 110 (2010) 111–131.
4. M. Knez, K. Nielsch, L. Niinistö: Synthesis and Surface Engineering of Complex Nanostructures by Atomic Layer Deposition. *Advanced Materials* 19 (2007) 3425–3438.
5. J. Ren: Initial Growth Mechanism of Atomic Layer Deposition of ZnO on the Hydroxylated Si(1 0 0)-2×1: A Density Functional Theory Study. *Applied Surface Science* 255 (2009) 5742–5745.

¹⁵ *Fotokatalitikus hatású* egy anyag vagy felület, ha az egy fény hatására végbemenő kémia reakció (fotoreakciót) lefolyását felgyorsítja.

Hamarosan itt az október, a Nobel-díjak hónapja:

A 2012-ES FIZIKAI NOBEL-DÍJAKRÓL

Geszi Tamás

ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

A fizikai Nobel-díjat 2012-ben megosztva kapta a francia *Serge Haroche* és az amerikai *David Wineland*.¹ A díjat mindkettejüknek 68 éves korukban ítelték oda, és mindketten fantasztikus kísérletek sok éven át tartó fejlesztésével járultak hozzá a *kvantumfizika* világának megismeréséhez.

Ebben a világban léteznek az elektronok, atommagok, de a belőlük felépült atomok és molekulák, sőt még a gyenge fényben felsejlő fényrészecskék, a fotonok is. A mozgásuk hullámmozgás, aminek talán legfeltűnőbb tulajdonsága, hogy még egyetlen elektronnak sincs élesen meghatározott helye, hanem a hullám rajzolatán bárhol lehet, ez a hullám szét is szakadhat, és részei egy időben többfelé is mozoghatnak. Az egymástól eltávolodó részhullámok azonban mintázatukba kódolva magukban hordozzák egymás emlékét, amit ki is lehet belőlük olvasni. Ehhez az kell, hogy a részhullámok jól megtervezett csatornák befutása után újra találkozzanak – hogy ezt miképp kell csinálni, arról bőszeges előzetes tudásunk halmozódott fel a fényhullámoknál több mint kétszáz éve ismert „interferenciajelenségek” tanulmányozásából.

Ezen alapul a *kvantumszámítógép* néhány évtizedes álma: valamikor talán a mai számítógépek „biteket” megjelenítő – a maguk nyelvén vagy igent, vagy nemet mondó – alkatrészei helyett ilyen kétfelé terelt anyaghullámokba, a sokféle kombinációban igent is, nemet is mondó úgynevezett „qubitekbe” (kvantumbitekbe) kódolt információ kezelésével fogunk tudni megoldani ma még lehetetlennek látszó számítástechnikai feladatokat.

A kritikus mozzanat az egészben az, hogy az emlékeket, a tárolt információt meg kell védeni a környezet zavaró hatásaitól egészen a kiolvasás pillanatáig, ami néha reménytelenül nehéznek látszik, és erősen leszűkíti a szóba jöhető fizikai rendszerek választékát. Valahol mégis hozzá kell kezdeni, és ezt tette meg a két 2012. évi Nobel-díjas, két különböző fizikai megvalósításban.

Haroche és csapata egy hosszú évek során kifejlesztett szobanagyságú berendezésben, a *mikrométerben* két tükrök, a világ legtökéletesebben tükröző tükröi között pattogó mikrohullámú fényvillanást hasított ketté egy átrepülő, trükkösen preparált atom segítségével, majd egy második atommal kiolvasta az első által visszahagyott üzenetet, amit a hihetetlenül kifinomult berendezés sikeresen őrzött meg az első atomtól a másodikig eltelt századmásodpercnyi idő alatt. Ez az emberi léptékkal mérve rövid idő nagyon

is hosszú a mikrohullámú láthatatlan fény kvantumai, a fénysebességgel száguldó fotonok számára, ők ennyi idő alatt több ezer kilométert is repülnek a két tükrök között pattogva, a különleges körülmények között mégis megőrizve a hullámmozgásban tárolt információt.

Wineland egy készen kapott, és már sok éve Nobel-díjakkal is megjutalmazott berendezést, az *ionsapdát* használta hasonló célra. Ebben a csapdában, trükkösen egyensúlyozó mozgással kerülve el a kicsúsás veszélyét, ionok, vagyis elektromos töltésű atomok rezegnek, egyedül vagy sorba állítva, ami lehetővé teszi, hogy különleges minőségű lézerekkel, egyes ionokat megcélozva, információt lehessen beírni akár az ionok színeképebe, akár rezgő mozgásukba. Eközben a sorba állított ionok egymással is kommunikálnak, ami egyszerű számítási feladatok megoldását is lehetővé teszi. Winelandnak és csapatának elsőként sikerült kétfelé terelni egy rezgő ion anyaghullámát, megőrizve a két részhullámban tárolt emléket a kiolvasásig, a soron következő években pedig kitartó fejlesztő munkával egyre bonyolultabb kvantumszámítási feladatokat oldottak meg a rezgő ionjaik segítségével. Bár a bonyolultság itt ma még néhány bites műveleteket jelent, amitől a hasznosítható eredmények beláthatatlanul távol esnek, a sikerek sok komoly kutatót optimizmussal töltenek el a majdani kvantumszámítógépek jövőjét illetően. A fejlesztések melléktermékeként azonban született már azonnal hasznosítható eredmény is, az eddigi legjobbknál százszor pontosabb *atomórák* alakjában. Hihetetlenül pontosak ezek az órák: mérési hibájuk olyan kicsi, mintha az Ősrobbanástól napjainkig eltelt idő mérésében csak öt másodpercet hibáznánk.

Winelandék első neves kísérletének, az egyetlen rezgő ion kétfelé terelésének (Schrödinger híres-hírhedt szemléltetése, az egyszerre élő és halott állapot felé vezérelt boldogtalan macska mintájára ők ezt „Schrödinger-macskának” nevezték, a hullám mivoltában megkettőzött iont pedig „cat-ion”-nak) magyar vonatkozása is van: *Janszky József* és tanítványa, *Kis Zsolt* elméleti elemzése szolgált a kísérletezők egyik fontos forrásául.

Talán nem ünneprontás megjegyezni, hogy időközben született még egy ígéretes fizikai megvalósítása a qubitnek, a kvantum információhordozónak, szupravezető áramkörök alakjában. Ezeket kezdettől nagy csapatok fejlesztik, nehéz lenne belőlük egy-két ember nevét kiragadni, ami nem kedvez a Nobel-díjak lehalászásának, de lehet, hogy majd ez a megvalósítás visz legközelebb a kvantumszámítógépek álmahoz.

¹ A Nobel-díjazottakról rövid hír jelent meg a Szemle tavaly novemberi számában.

SZÁZ ÉVE TÖRTÉNT: HAZAI TUDÓSÍTÁS LAUE BRILIÁNS ÖTLETÉRŐL

Radnai Gyula
ELTE TTK Fizikai Intézet

Száz évvel ezelőtt a *Fizikai Szemle* még csupán egy rovat volt a *Mathematikai és Physikai Lapok*ban, a Matematikai és Physikai Társulat hivatalos folyóiratában. (Innen kapta új címét is az örökébe lépő fizikai folyóirat 1950-ben.) Ebben a rovatban jelentek meg a legfrissebb hírek, tudósítások a fizika világából.

1914-ben például *Bartoniék Emil* ismertette a legújabb külföldi fizikai kísérleteket, többek között a fémek termoelektromos állandóinak mérésével, vagy a katódsugarak nyomásának mérésével kapcsolatosakat. Ugyanakkor *Rybár István* az anomális Zeeman-effektusról, *Hevesy György* az atomok szerkezetéről, *Tomits István* különböző sugárzásmérésekről, *Selényi Pál* fotometriai mérésekről érkezett. Amikor cikkek jelentek meg, még egyikük se töltötte be 30. életévét. *Eötvös Loránd*, a Társulat elnöke, elszántan és következetesen fiatalított: 2013-ban éppen száz éve, hogy a Társulat matematikai, illetve fizikai titkári tisztét a 33 éves *Fejér Lipótra* és a 34 éves *Zemplén Győzőre* bízta, akik a következő évben már át is vették a *Mathematikai és Physikai Lapok* szerkesztését az akkor 52 éves *Rados Gusztávtól* és *Kövesligethy Radó*tól.

Rybár István (1886–1971), *Hevesy György* (1885–1966), *Tomits Iván* (1886–1953), *Selényi Pál* (1884–1954) neve jól cseng a mai olvasók fülében. Még a *Bartoniék* név is ismerős: *Bartoniék Géza* volt a nevezetes B.G. úr, több mint három évtizeden át az Eötvös Collegium igazgatója. De ki volt *Bartoniék Emil*?

Ő volt *Bartoniék Géza* egyetlen fia, aki édesapjától tanulta meg szeretni a fizikát.

Bartoniék Géza (1854–1930) Nagyszombatban kezdte és Pozsonyban fejezte be középiskolai tanulmányait. Utána a pesti egyetemre ment földrajzot és csillagászatot tanulni, de a nála csak néhány évvel idősebb *Eötvös Loránd* előadása és személyisége annyira lenyűgözte, hogy érdeklődése teljesen a fizika felé fordult. Szerencsére tehetsége is volt hozzá. Természettani diplomájának megszerzése után bent maradt az egyetemen: *Eötvös* maga mellé vette tanársegédnek, majd néhány év múlva segítette elhelyezkedni a polgári iskolai tanítóképzőben. Itt tanított fizikát 1895-ig, amikor újra *Eötvös* kérésére módosított pályát: elvállalta az akkor induló *Eötvös József Collegium* igazgatását. Az ő tevékenysége nyomán vált ez a kollégium országos hírű, sőt, az ország határain túl is ismert, nívós tanárképző intézménnyé.

Őt gyermeke volt; négy leány és egy fiú. A lányok közül *Bartoniék Emma* (1894–1957) történész, bibliográfus lett, negyvenes éveiben ő volt az Országos Széchényi Könyvtár levéltárának vezetője. *Bartoniék Anna* (1896–1978) festő lett és grafikus, művei ma is

keresettek a képzőművészeti aukciókon. A másik két lány sorsa mára már homályba veszett. Emil öt évvel volt idősebb Emmánál és héttel Annánál. Őt nem a művészetek vagy a humán tudományok érdekelték, hanem a fizika, vagy ahogy akkor mondták: a természettan. A Mintagimnáziumban érettségizett – a mai Trefort Gimnázium elődjében –, majd *Eötvös-kollégistaként* a budapesti tudományegyetemen szerzett mennyiségtan-természettan szakos középiskolai tanári diplomát. De nem gimnáziumban kezdett tanítani, hanem egyenesen a *József Műegyetemre* került, ahol 24–25 éves korában írt egy kiváló cikket a *Mathematikai és Physikai Lapokba* *A Röntgensugarak természetéről*.

A röntgensugárzás témája az által lett akkor újra aktuális, hogy *Laue* briliáns ötlete nyomán megindulhatott a röntgen-szerkezetkutatás. Ezt az izgalmas időszakot mutatta be szakszerűen és érdekesen *Bartoniék Emil*. Cikke kétszeresen is megérdemli figyelmünket 2013/14-ben: nemcsak az anyagtudományok egyik korszakos felfedezésének centenáriuma okán, hanem azért is, mert kiderül belőle, mennyire ráértett egy fiatal magyar fizikus a fizika akkori frontvonalára.

A fizikatörténetet kedvelők számára külön örömet okoz majd, hogy bepillantást nyerhetnek a szaktudomány akkori állásába, vitatott, még nem eldöntött kérdéseibe is, mégpedig azon a magyar nyelven, amelyen száz évvel ezelőtt írtak és beszéltek itthon a fizikusok.

Bartoniék Emil írásának fő forrása a következő cikk volt: *W. Friedrich, P. Knipping, M. Laue: Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. Sitzungsberichte der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München* (1912) 303–322., újraközölve *Annalen der Physik* 41 (1913) 971–988.

Terjedelmi korlátok miatt nem közölhető *Bartoniék* egész cikke, de legfontosabb részeit érdemes lesz szó szerint – az akkori helyesírással – idézni. Kezdjük mindjárt a bevezetéssel.

„A RÖNTGENSUGARAK TERMÉSZETÉRŐL.

Csaknem általánosságban el van fogadva az a felfogás, hogy a Röntgensugarak a fényhez hasonló elektromágneses hullámok. E mellett a felfogás mellett számos tapasztalat szól, így: a Röntgensugarak mágneses tér által való eltéríthetlensége; azon körülmény, hogy a Röntgensugarak terjedési sebessége $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec tehát ugyanaz, mint a fény- és általában minden elektromágneses hullámé; s az elektromágneses felfogás mellett bizonyít az a szoros analógia is, mely a fény, főleg ibolyán túli fény és a Rönt-

gensugarak ionizáló képessége közt fönnáll. Más kísérletekből ismét a Röntgensugarak szerkezetére is következtetést vonhatunk. WALTER és POHL igen keskeny ék alakú réseken keresztül felvett elhajlási fotogramjai alapján a Röntgensugarak hullámhosszának nagyságrendje 10^{ad}–9 cm-nek tekinthető. BARKLA és BASSELS kísérleteiből kitűnt, hogy a Röntgensugarak többé-kevésbé polarizálhatók. Mindezen megfigyelések alapján úgyszólván biztossággal lehet a Röntgensugarak elektromágneses természete mellett dönteni.”

A tömör bevezetés után Bartoniek Emil rögtön a lényegre tér:

„Röntgensugaraknál az optikaiakkal analóg interferenciajelenségek létesítése a valószínűen rendkívül csekély hullámhossz miatt, nagy nehézségekkel jár. A Röntgensugarak elhajlására pl. azok hullámhosszát nem lényegesen meghaladó, tehát 10^{ad}–9 cm-nél nem lényegesen nagyobb állandójú rácsra lenne szükség. Ilyen rács készítésére természetesen gondolni sem tehet. M. LAUE megtalálta e nehézségek igen elmés és egyszerű megoldását. BRAVAIS elmélete (1850) szerint ugyanis kristályokban a molekulák szabályosan vannak elrendezve. A kristályban szabályosan elrendezett molekulák kölcsönös távolsága – a kristály sűrűsége, molekulásúlya és egy grammolekulában foglalt molekulák számából – minden kristályos anyagnál körül belül 10^{ad}–8 cm-nek adódik. Így a kristályokat mintegy 10^{ad}–8 cm rácsállandójú térbeli rácsoknak tekinthetjük. LAUE gondolata az volt, hogy Röntgensugaraknak kristálylemezen, tehát egy körülbelül 10^{ad}–8 cm állandójú térbeli rácson áthaladva elhajlást kell szenvedniök. LAUE ezen feltevésének helyességét a felszólítására FRIEDRICH és KNIPPING által végzett kísérletek teljesen igazolták.”

1914 decemberében, amikor Max von Laue Nobel-díjat kapott „a röntgensugár kristályokon létrejövő diffrakciójának felfedezéséért”, a díj harmadrészéről Walter Friedrich és Paul Knipping javára nyilvánosan lemondott. Nemcsak erről, de még Laue Nobel-díjáról se tudott Bartoniek Emil, amikor a cikket írta. Áttekinthető ábrán ismertette azonban a kísérleti összeállítást és beszámolt a mérés tapasztalatairól, többek között erről is:

„Legtöbb kristálylemez csak a primér-sugártól igen kevésé eltérő irányokban szolgáltatott elhajlított sugarakat; ezért csak a primér-sugarakat is felfogó fotografikus lemezen, azon is csak a középső folt közelében, lehetett interferenciafoltokat kapni, egyedül a gyémántnál lehetett nagyobb szögekkel elhajlított sugarak nyomát a lemezekon előállítani. A kristály helyére amorf testeket téve, szintén jelentkeztek elhajlási ábrák, ez esetben azonban kitüntetett irányok nélkül, a primér-sugarak átütési pontja körül szimmetrikusan elosztva. Kanadabalzsamnál, parafinnál, borostyánknél stb. az átütési pontot lassanként elhomályosodó udvar vette körül, viasznál több koncentrikus kör jelentkezett.”

Ezután következik Laue magyarázata:

„LAUE szerint a kristályoknál az interferenciafotogramok egészen hasonlóan keletkeznek, mint a fényelhajlási képek optikai rácsoknál. A különbség csak abban van, hogy míg az optikában lineáris, illetőleg síkbeli rácsokkal (keresztezett rácsok) dolgozunk, a Röntgensugarak interferenciaképei térbeli rácsokon keresztül létesültek. Az amorf anyagoknál fellépő diffrakcióképek analogonja a holdudvar, általában ködben a fényforrásokat körülvevő udvar s magyarázásuk is ezekéhez teljesen hasonlóan történik; az optikai jelenségeknél a levegőben lebegő nagyobb anyagi részekon, Röntgensugaraknál a szabálytalanul elrendezett molekulákon történik az elhajlás. A következőkben közelebbről fogjuk megvizsgálni a kristályokon létesülő elhajlási jelenségeket.”

Ezt a vizsgálatot teljes részletességében itt nem közölhetjük. Bartoniek közli Laue gondolatmenetét és világos magyarázatokat fűz hozzá. Kitér a reciprokrácsra, benne az Ewald-gömbbel történő szerkesztésre, s mindjárt hivatkozik is rá: „L. P. P. EWALD: *Phys. Zeitschr. XIV.* 465. l. (1913)” (Ma már ismert, hogy Ewaldnak fontos szerepe volt Laue ötletének megszületésében. 1912-ben mindketten Münchenben dolgoztak, Sommerfeld elméleti fizikai intézetében, Laue mint egyetemi docens, Ewald pedig mint Sommerfeld doktorandusza. Ewald a látható fénynek kristályokban történő terjedéséről írta doktori disszertációját, és bemutatta téziseit Lauénak. Ezt meglátva kezdte foglalkoztatni Lauét a rácsállandóval összemérhető hullámhosszú elektromágneses hullámok terjedése a kristályban.)

Bartoniek Emilnek Laue gondolatmenetéről írt beszámolója jóval részletesebb, mint ami például ma a Budó–Mátrai *Kísérleti fizika III.*-ban található, de a ZnS kristállyal történt mérés ábrája s a közölt Laue-diagram lényegében ugyanaz, mint az említett tankönyvben. Az elméleti és kísérleti eredmények ismertetése után tér rá Bartoniek arra a visszhangra, amelyet ezek a felfedezések fizikus körökben keltettek.

„Az a szabadoság, melylyel LAUE elmélete az interferencia fotogramokon feltalálható pontok helyzetét megadja, úgyszólván kétségtelessé teszi az elmélet legalább alapgondolatának helyességét. A Röntgen-interferenciajelenségek többi magyarázója is úgyszólván mind a LAUE-féle alapfeltevésekből indulnak ki s inkább csak annak egy más irányban való kiegészítésére törekszenek. Lényeges eltérés LAUE elméletétől csak STARK magyarázásmódjában van. STARK a Röntgensugarakat korpuszkuláris sugaraknak tekinti; a kristály térrács-szerkezete az elektromos részecskék áthaladását különböző irányokban különböző mértékben akadályozza s innen adódik a fotografikus lemez egyes pontjaiban való erősebb feketedés. Az interferencia foltok ezen elmélet alapján várható elrendezése azonban nem egyezik a fotografikus felvételeken tényleg mutatkozó interferenciaképekkel s így az elmélet a kísérleti próbát nem állja. Látszólag ellentétben vannak LAUE felfogásával BRAGG, MAN-

DELSTAM, ROHMANN s még többen, kik a Röntgen-interferenciajelenséget a kristály hasadási felületein történő reflexió következményének tartják. De az elterés tényleg csak látszólagos, mert ha az elmélet helyesen meg is adja az interferencia pontok helyzetét, ezáltal tulajdonképpen csak a jelenség leírását nyertük, ámde magát a hasadási felületen történő reflexiót megint csak LAUE felfogása szerint, mint a kristály-molekulákból kiinduló szekundér-sugarak interferenciáját kell értelmeznünk.”

Bartoniek Emil ezután kitér a termikus effektusokra, részletesen ismerteti az itthon is jól ismert és közkedvelt *Peter Debye* holland fizikus elméletét, ugyancsak egy 1913-as cikke alapján:

„A térrács-interferenciajelenségek elméletét LAUE alapfeltevéseiből kiindulva, de a molekulák hőmozgása tekintetbevételével dolgozta ki DEBYE. DEBYE elméletében a molekulák helyzete nem változatlan, hanem azok adott (x, y, z) koordinátájú pontok körül különböző kristályoknál és más-más hőmérsékleten különböző amplitudójú rezgőmozgást végeznek. Ezen egyensúlyi helyzetük körül szabálytalan rezgő mozgásokat végző molekulákból kiinduló elemi sugárzásokat összegezve, DEBYE a kristálylemezből kiinduló s különböző irányokban megfigyelhető intenzitások algebrai kifejezését nyerte. E kifejezés két részből áll, az egyik LAUE intenzitáskifejezésével azonos, ez az interferenciasugárzásnak felel meg, a másik rész minden irányban egyenletesen eloszló szét-szórt sugárzást állít elő. A hőmérséklettel, tehát a molekulák mozgásának hevességével megváltozik e két rész viszonya, a hőmérsékletváltozás irányának megfelelően az interferenciapontok jobban vagy kevésbé fognak a fotogramm alaptónusától eltérni, de az interferenciafoltok területe, illetőleg azok élessége nem fog a hőmérséklettel módosulni.”

De még Debye se az utolsó szót mondta ki a témában, mivel *Schrödinger* 1914-es cikke talán már a korrektúra olvasása közben került Bartoniek Emil kezébe, akinek volt alkalma így még a Born–Kármán- és az Einstein-modellre is hivatkozni:

„A Röntgen-interferenciajelenségeknél fellépő hőmérsékleti hatás – a DEBYE-effektus – elméletét SCHRÖDINGER DEBYE-től némileg eltérően vezette le. SCHRÖDINGER számításai alapjául oly atommodell szolgál, melynél a szabályos rendszer szerint hexaeder-térrács csúcspontjaiban elhelyezett molekulák nem mint DEBYE-nél változatlan egyensúlyi helyzetűkhöz, hanem a szomszédos molekulákhoz vannak kvázielasztikus erők által kapcsolva. (Ily értelemben egymástól eltérő atommodellek szerepelnek egyrészt EINSTEIN, másrészt BORN és KÁRMÁN szilárd testek fajhevére vonatkozó vizsgálatainál.) Ily atommodellből kiindulva SCHRÖDINGER arra az eredményre jutott, hogy a DEBYE által levezetett intenzitáseloszlásbeli változáson kívül az interferenciafoltok élessége is módosul a hőmérséklettel, oly módon, hogy emelkedő hőmérséklettel a foltok területe mindin-

kább növekszik, azok lassanként az egész lemezt belepik s a különálló foltok helyét egyenletesen fektetett mező foglalja el.”

Végül a cikk egy friss kísérleti eredménnyel zárul:

„A Röntgen-interferenciajelenségek a kristályok szabályos, térrács-szerű molekuláris elrendezését is bizonyítják, ugyanis e szabályos molekuláris elrendezés az interferenciaképek létrejöttének ép annyira szükséges feltétele, mint az interferáló szekundér sugarak periodicitása. Így a Röntgen-interferenciajelenségek az anyagok molekuláris szerkezetének megvizsgálására is alkalmas eljárást szolgáltatnak. A molekuláris szerkezet Röntgensugarakkal való kikutatására egy esetben történt is már kísérlet: VAN DER LINGEN ily módon megállapította, hogy a folyékony kristályok nem térrácsszerkezetűek, tehát nem tulajdonképeni kristályok.”

Szinte biztosak lehetünk benne, hogy a 25 éves Bartoniek Emil szívesen megismételte volna ezt a kísérletet, és maga is ki akart találni újabbakat az anyagok molekuláris szerkezetének vizsgálatára. Hasonló programot tűzött ki a nála egy évvel fiatalabb *Lawrence Bragg* a cambridge-i Trinity College-ban, akit azután a Leedsi Egyetem fizikai tanszékén dolgozó apja, *Henry Bragg* segített „a kristályszerkezet röntgensugár-módszerrel történő analízisének” kidolgozásához, s a következő évi, 1915-ös fizikai Nobel-díj közös elnyeréséhez.

Igaz, nem tudtak igazán örülni a díjnak, mivel Henry Bragg másik fia 1915-ben elesett Gallipolinál, a közben kitört világháborúban. Ugyanitt esett el a 28 éves *Henry Moseley* is, aki az atomok által kibocsátott karakterisztikus röntgensugárzás vizsgálatával jutott el a periódusos rendszerbeli rendszám atomfizikai jelentésének felismeréséhez.

A tudományos sikerekért folyó versenyt elnyomta a katonai verseny, olykor a nemesebb feladatra termett tehetséges fiatalok életét is követelve. Így esett el a front innenső oldalán, Isonzónál ugyancsak 1915-ben az osztrák fizikus, *Boltzmann* utóda, *Schrödinger* tanára, *Friedrich Hasenöbhl*, vagy a magyar Zemplén Győző szintén az olasz fronton 1916-ban.

Bartoniek Emil, a műegyetem fizikai intézetének 26 éves tanársegédje sem tudta beváltani a tudományos pályafutásához fűzött reményeket. Bartoniek Géza egyetlen fia, aki mint a cs. és k. 38. (kecskeméti) gyalogezred tart. zászlósa vonult be, elesett a háborúban, roham közben a Kárpátokban. Nem követte, hanem megelőzte tanárát, Zemplén Győzőt.

Ha ma a *História Tudósnaptárban* szócikk készülne róla, az így kezdődhetne:

Bartoniek Emil

Budapest, 1889. ápr. 8. – Kryvka, 1915. febr. 6.

Magyar fizikus

Munkája: A röntgensugarak természetéről. *Math. és Phys. Lapok* (1914) 144–156.

És így is fejeződne be.

XVI. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY

Beszámoló, II. rész: a döntő feladatai és megoldásuk

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

I. kategóriájú feladatok

1. feladat (kitűzte: Radnóti Katalin)

Mekkora lenne az alapállapotú H-atom mérete, ha a mag és az elektron nem elektromosan, hanem csak gravitációsan vonzanák egymást? Mekkora lenne az alap és a gerjesztett állapotok energiája?

Megoldás:

Az energia kiszámításakor a (kvantummechanikai) mozgási és a potenciális energia összegét kell venni. Most a gravitációs potenciális energia szerepel az elektromos helyett, azaz

$$E(r) = \frac{\hbar^2}{2 m_e r^2} - \gamma \frac{m_e m_p}{r}$$

minimumát kell venni, s ebből

$$r = \frac{\hbar^2}{\gamma m_e^2 m_p}$$

A számadatokat behelyettesítve:

$$r = \frac{(1,055 \cdot 10^{-34})^2}{6,6738 \cdot 10^{-11} \cdot (9,11 \cdot 10^{-31})^2 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27}} = 1,2 \cdot 10^{29} \text{ m}$$

lenne alapállapotban.

Összehasonlításképpen: a Föld sugara: 6370 km = $6,37 \cdot 10^6$ m, a Föld-Nap távolság 150 millió km = $1,5 \cdot 10^{11}$ m. Az energiakifejezésbe visszahelyettesítve r értékét megkapjuk az alapállapotú és a gerjesztési energiákat:

$$E_n = - \frac{\gamma^2 m_e^3 m_p^2}{2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Az alapállapotra ($n = 1$) például $2,49 \cdot 10^{-78}$ eV-ot ad.

A megoldáshoz egyszerűbb gondolatmenet alapján is el lehetett jutni: hasonlítsuk össze az elektromos és a gravitációs potenciális energiát, mivel ezekben lesz különbség!

$$\left(\frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0} \right) \frac{1}{r} \Rightarrow (\gamma m_e m_p) \frac{1}{r}$$

Más szóval minden hidrogénatom-képlet érvényben marad, csak a képletekben előforduló bal oldali zá-

rójeles kombinációkat a jobb oldali zárójeles kombinációval kell helyettesíteni. Ezt követően pedig egyszerű behelyettesítéssel megkaphatók a számszerű értékek.

2. feladat (kitűzte: Kis Dániel és Szűcs József)

a) Hasonlítsuk össze egy 1 km sugarú neutroncsillag tömegét a Föld tömegével!

b) Mekkora lenne a nehézségi gyorsulás értéke a neutroncsillag felszínén?

Első megoldás:

a) A neutroncsillag jó közelítéssel magyagsűrűségű. Egy A tömegszámú mag tömege közelítőleg:

$$m = \frac{A}{N_A} = \frac{A}{6 \cdot 10^{23}} \text{ g,}$$

miel A grammnyi anyagban van $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ Avogadro-számnyi részecske. E mag sűrűsége gömbszerű egyenletes anyageloszlás mellett:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{3A}{N_A 4 \pi R^3}$$

Ismert, hogy az R magugárra: $R^3 = r_0^3 A$, ahol $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m. Azaz

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{3A}{N_A 4 \pi r_0^3 A} = \frac{3}{6 \cdot 10^{23} \cdot 4 \pi \cdot (1,2 \cdot 10^{-15})^3} = \\ &= 2,3025 \cdot 10^{20} \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 2,3025 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \end{aligned}$$

Ezek alapján az 1 km sugarú neutroncsillag tömege:

$$\begin{aligned} M_{cs} &= \rho \frac{4 \pi}{3} R_{cs}^3 = 2,3025 \cdot 10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,189 \cdot 10^9 \text{ m}^3 = \\ &= 9,6447 \cdot 10^{26} \text{ kg.} \end{aligned}$$

A Föld tömege $5,97 \cdot 10^{24}$ kg, tehát a neutroncsillag tömege körülbelül 160-szor nagyobb.

b) A nehézségi gyorsulás a felszínen:

$$\begin{aligned} g_n &= \gamma \frac{M_{cs}}{R_{cs}^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{9,64 \cdot 10^{26} \text{ kg}}{10^6 \text{ m}^2} = \\ &= 6,43 \cdot 10^{10} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \end{aligned}$$

Második megoldás:

a) A megoldás során nem szükséges numerikusan kiszámítani a sűrűséget, mivel a $4\pi/3$ úgyis kiesik.

$$M_{cs} = \rho \frac{4\pi}{3} R_{cs}^3 = \frac{3A}{N_A 4\pi r_0^3 A} \frac{4\pi}{3} R_{cs}^3 = \frac{1}{N_A} \left(\frac{R_{cs}}{r_0} \right)^3.$$

Itt $R_{cs} = 1$ km, a neutroncsillag sugara. Behelyettesítve:

$$M_{cs} = \frac{1}{6 \cdot 10^{23}} \left(\frac{1000}{1,2 \cdot 10^{-15}} \right)^3 = 9,64 \cdot 10^{29} \text{ g} = \\ = 9,64 \cdot 10^{26} \text{ kg}.$$

A b) feladat megoldása ugyanaz, mint előbb.

3. feladat (kitűzte: Kis Dániel)

Az elektromosságtanból ismert, hogy mágneses momentumot hurokáramok hozhatnak létre. A neutron semleges részecske, tehát áramot nem hozhat létre, mégis van mágneses momentuma. Hogyan lehetséges ez?

Megoldás:

A neutron mágneses momentuma a nem nulla spinjétől ered. Ez azonban önmagában nem lenne elég, töltés nélkül nem csatolódhatna az elektromágneses térhez (lásd például neutrínó: van spinje, de nincs mágneses momentuma). Viszont ma már tudjuk, hogy a neutron nem elemi részecske, belső szerkezete van, három kvark alkotja. A három kvark két különböző elektromos töltéssel rendelkezik (udd, u $+2/3$, d $-1/3$ elemi töltéssel), amelyek inhomogén töltéseloszlást eredményeznek. Inhomogén töltéseloszlásnak pedig már van (lehet) mágneses momentuma, ha perdületjellegű mennyiség (például spin) is jelen van.

4. feladat (kitűzte: Szűcs József)

A svájci ETH egyetem kutatói új módszerrel mérték meg nagy pontossággal a proton méretét. Korábban nagy energiájú elektronok bombázásával – Rutherford kísérletéhez hasonló módon – mérték meg a proton kiterjedését, másrészt pedig gerjesztett hidrogénatomok által kibocsátott ultraibolya sugárzás hullámhosszának mérésével következtettek a protonok méretére. Mindkét módszerrel 0,88 fm protonszugarat mértek.

A mostani mérésnél viszont a H-atomban az elektronokat a náluk körülbelül 200-szor nehezebb negatív elektromos töltésű müonokkal helyettesítették. A proton-müon rendszerek gerjesztését követő röntgensugárzás hullámhosszából következtettek a protonok méretére, amelyre a korábbi eredményektől eltérően körülbelül 4%-kal kisebb, 0,84 fm protonszugarat kaptak. A mérést többször és más-más időpontban elvégezve, a hibahatáron belül ugyanerre az eredményre jutottak. Ez esetleg új elemi részecskék létének feltételezését is eredményezheti.

a) Vajon hogyan értelmezhető, hogy a H-atom (illetve a müon-proton atom) gerjesztésekor kibocsátott fény hullámhossza kapcsolatban van az (atommodel-

lekben általában pontszerűnek tekintett) atommagok (H-atomnál a proton) méretével?

b) Miért lehet proton-müon rendszer gerjesztésével pontosabban meghatározni a proton méretét, mint a közönséges H-atom gerjesztéssel?

Megoldás:

a) A kvantummechanikai atommodell szerint az elektron nem pontszerű – amely az atommagtól relatíve nagy távolságban (10^4 - 10^5 magsugárnyira) körpályán kering a mag körül –, hanem állóhullámként veszi körül az őt fogva tartó atommagot (jelen esetben a proton). A modell szerint az elektron véges valószínűséggel tartózkodik az ugyancsak nem pontszerű, véges méretű protonon belül is, ahol már a Coulomb-potenciál semmiképpen sem az $1/r$ törvény szerint vehető számításba. Ezért a H-atom alapállapotában leginkább, de bizonyos mértékben a gerjesztett állapotokban is módosul a proton-elektron rendszer energiája a pontszerű atommag feltételezésével számítottakhoz képest. Ez jelentkezni fog az elektronátmenetknél, és így a kibocsátott fény hullámhossza is megváltozik. E változás pontos mérésével, valamint az elektron állapotfüggvényének felhasználásával következtettek arra, hogy az elektron mennyit és mekkora térfogatban tartózkodik az atommagon belül. Ilyen módon lehetett ebből az atommag (proton) méretét meghatározni.

b) Mivel a negatív müonnak körülbelül 200-szor nagyobb a tömege, ezért a H-atomban az állapotfüggvényének kiterjedése is jóval kisebb (körülbelül 200-szor kisebb), mint az elektroné. Vagyis a proton a müont jóval közelebb húzza magához alapállapotban, mint a könnyebb (ezáltal mozgékonyabb) elektront. Ezért a müon többet tartózkodik a protonon belül, mint az elektron. Így a proton-müon rendszerrel a fent leírt effektus jóval erősebben jelentkezik, mint a közönséges H-atomnál, így a proton mérete is pontosabban határozható meg.

5. feladat (kitűzte: Szűcs József)

Ha a hidrogéngázt fokozatosan melegítjük, akkor a részecskék ütközésének következtében először a hidrogénmolekulák atomokra bomlanak, majd a forró atomos gáz „világítani” kezd.

a) Két, átlagos mozgási energiával rendelkező H_2 -molekula azonos sebességgel ütközik frontálisan, és ennek következtében mindkettő atomokra esik szét. Mekkora lehet ekkor a gáz hőmérséklete?

b) Két átlagos mozgási energiájú, azonos sebességű, alapállapotú H-atom ugyancsak frontálisan ütközik, ezt követően egy látható foton keletkezik a Balmer-sorozat első vonalának megfelelő hullámhosszal. Ekkor mekkora a hidrogéngáz hőmérséklete?

c) Vessük össze az a) és b) kérdéseknél kapott eredményeket azzal a gyakorlati tapasztalattal, hogy a gáz-molekulák egy része már 1-2 ezer kelvin hőmérsékleten is atomokra esik szét, és a Nap 5800 K hőmérsékletű felszínének spektrumában megtalálhatók a hidrogéngáz színképvonalai! Mondjunk róla véleményt!

Adatok: A H_2 -molekula kötési energiája 4,52 eV. A H-atom energiája alapállapotban: $-13,6$ eV.

Megoldás:

a) Tegyük fel, hogy az ütköző molekulák teljes egészében elveszítik mozgási és forgási energiájukat. (Ezt a lendületmegmaradás törvénye megengedi, mivel a feltétel szerint az ütköző molekulák összes lendülete zérus.) Ekkor felírhatjuk:

$$2 \frac{5}{2} k T = 2 E_k \rightarrow T = \frac{2 E_k}{5 k} = \frac{2 \cdot 4,52 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} = 2,0962 \cdot 10^4 \text{ K} = 20\,962 \text{ K}.$$

Itt E_k a molekula kötési energiáját jelöli.

b) Ugyancsak feltehetjük, hogy a H-atomok az ütközéskor elveszítik teljes mozgási energiájukat. Így a mozgási energiák összege csak az egyik atom gerjesztésére fordítódik, mivel egy foton jelenik meg. A feltételnek megfelelően a 3. energiaszintre kell gerjeszteni az egyik atomot az ütközési energia révén, hogy a $3 \rightarrow 2$ elektronátmenet során a megadott hullámhosszúságú foton keletkezzen. Így felírhatjuk:

$$2 \frac{3}{2} k T = E_3 - E_1 \rightarrow \rightarrow T = \frac{E_3 - E_1}{3 k} = \frac{-13,6 \text{ eV} - (-13,6 \text{ eV})}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}} = 4,672 \cdot 10^4 \text{ K} = 46\,720 \text{ K}.$$

c) Az eredményül kapott hőmérsékleti értékek jóval magasabbak (körülbelül egy nagyságrenddel), mint a feladatban megadott hőmérsékletek, amelyeken a fenti jelenségek (molekulák felbomlása, atomok fénykibocsátása) a tapasztalat szerint már létrejönnek. A paradoxon oka a *részecskék sebességének Maxwell-eloszlása*, amely szerint egy adott T hőmérséklethez tartozó átlagos energiának megfelelő sebességnél (négyzetes középsebesség) jóval nagyobb sebességű részecskék is előfordulnak a T hőmérsékletű gázban. Így a fenti jelenségek már jóval alacsonyabb hőmérsékleten bekövetkeznek, mint az átlagos energiához tartozó hőmérséklet.

6. feladat (kitűzte: Vastagh György)

Termikus reaktorokban nagyon kis energiájú neutronok befogódása a ^{235}U atommagba már maghasadást tud létrehozni a létrejött ^{236}U atommagban. Mekkora energiájú gamma-fotonokkal lehetne a ^{236}U atommagot elhasítani?

Adatok: a neutron tömege: $1,008665 \text{ u}$, a ^{235}U tömege: $235,043923 \text{ u}$, a ^{236}U tömege: $236,045562 \text{ u}$, $1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV}/c^2$.

Megoldás:

A ^{236}U atommagot a hasadási gáton kell átjuttatni, azaz a gamma-fotontól is legalább akkora energiát kell kapjon az atommag, amekkorát a termikus neutron befogódásakor kap. A termikus neutron nem a

mozgási energiáját adja, hanem befogódásakor a kötési energiája szabadul fel, és áll a ^{236}U atommag rendelkezésére.

A $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U} + Q$ reakció energiamérlege:

$$Q = [M(^{235}\text{U}) + M(n) - M(^{236}\text{U})] c^2.$$

Az adatokat behelyettesítve:

$$Q = (235,043923 + 1,008665 - 236,045562) \text{ u } c^2 = 0,00726 \text{ u } c^2.$$

A megadott átváltással kapjuk:

$$Q = 0,00726 \text{ u } c^2 \cdot 931,494 \frac{\text{MeV}}{c^2} = 6,545 \text{ MeV}.$$

Tehát legalább ennyi energiát kell bevinni a gamma-fotonnak is, hogy átemelje az atommagot a hasadási gáton.

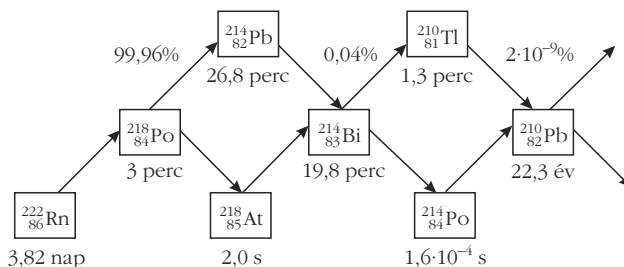
A megoldás során elhanyagoltuk azt, hogy a gamma-foton abszorpciójakor az atommag visszalökődik valamennyivel (a lendületmegmaradás miatt). A nagy magtömeg miatt azonban ez a visszalökődés csak nagyon kicsit szól bele az energiamérlegbe:

$$E_{\text{vissza}} = \frac{p^2}{2M} = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} = E_\gamma \frac{E_\gamma}{2Mc^2}.$$

Innen látható, hogy az atommag a visszalökődés során az eredeti gamma-foton energiájának csak igen kis töredékét képes átvenni.

7. feladat (kitűzte: Sükösd Csaba)

A radon bomlássémája a következő ábrán látszik. Porszívóval levegőt szívunk át gézrétegeken másfél órán keresztül egy hosszú időn át nem szellőztetett pincehelyiségben. Tíz perccel a szívás befejezése után a gézt béta-sugárzást érzéklni képes Geiger-Müller-számlálócső elé helyezzük, és 1 óra hosszat mérünk. A kezdeti beütésszám körülbelül 35-40 perc alatt csökken a felére.



a) Az ábrán szereplő bomlási sor mely tagjaitól származhat a mért beütésszámok döntő többsége?

b) Adjunk kvalitatív (nem-számításos) magyarázatot a 35-40 perces „effektív” felezési időre!

Megoldás:

a) Először azt kell megállapítani, hogy milyen bomlási módok láthatók az ábrán. A tömegszámokból és a rendszámokból kiderül, hogy a felfelé mutató nyilak

alfa-bomlásokat, a lefelé mutató nyilak pedig negatív béta-bomlásokat jeleznek. Mivel a detektorunk csak béta-sugarakat detektál, ezért csak a lefelé mutató nyilakat kell figyeljük ahhoz, hogy megállapítsuk, hogy a bomlási sor mely tagjaitól származhatnak a beütésszámok.

A gézen – mint szűrőn – a radon nem tud megtapadni, mivel nemesgáz. A többi bomlástermék azonban megtapadhat, mivel ezek fémek, és a levegőben lebegő porszemekre és aeroszolokra adszorbeálódhatnak.

Mivel 10 perc várakozás után kezdtük el a mérést, ezért a rövid felezési idejű izotópokból már sok elbomlott: a ^{218}Po (3 perc) és a ^{210}Tl (1,3 perc) emiatt kiesik. A ^{210}Pb az igen hosszú felezési idő miatt esik ki, hiszen a 22,3 év semmiképpen sem csökkenhet 35-40 perces „effektív” felezési idővel. A béta-bomló izotópok közül két jelölt maradt: a 26,8 perc felezési idejű ^{214}Pb , és a 19,8 perc felezési idejű ^{214}Bi . A detektált beütésszámok döntő többsége tehát ezektől származik.

b) Meglepő, hogy a mért „effektív” felezési idő sokkal hosszabb, mint bármelyik a kettő közül. Ennek az az oka, hogy ez a két izotóp egy „bomlási sort” alkot. Mindkét izotóp felezési ideje jóval kisebb, mint a bomlási sor kiinduló tagjáé (a radoné), valamint a feladat szerint hosszú ideig nem volt szellőztetve, ezért feltehető, hogy a szoba levegőjében már kialakult a radioaktív (szekuláris) egyensúly, azaz a sor tagjainak aktivitása megegyezik. Miután a felezési idejüknel jóval hosszabb ideig történt a mintavétel (porszívózás), ezért feltehető, hogy aktivitásuk arányos a szoba levegőjében lévő aktivitáskoncentrációval (és az arányossági tényező azonos, hiszen nem feltételezhető, hogy a két fémek különbözőképpen kötné meg a géz). Ezért a szűrőn lévő aktivitásuk is egyenlő – legalábbis a szívás befejezésekor. Detektorunk tehát a ^{214}Pb tényleges aktivitásának dupláját méri (mivel méri a vele azonos aktivitású ^{214}Bi -ot is). Viszont a ^{214}Bi a ^{214}Pb -ból keletkezik, ezért – ha az aktivitásuk egyenlő – kezdetben a ^{214}Bi aktivitása nem csökken (hiszen amennyi elbomlik belőle, ugyanannyi keletkezik is a ^{214}Pb -ból). Emiatt az aktivitás *csökkenése* kezdetben csak a ^{214}Pb -tól származik.

8. feladat (kitűzte: Radnóti Katalin és Szűcs József)

a) Becsüljük meg, hogy hányszor többet kell rugalmasan ütköznie a neutronoknak fékeződéskor a nehézvízes moderátorban a deutériumatomokkal, mint a könnyűvízesben a hidrogénatomokkal ahhoz, hogy kezdeti mozgási energiájuk 1% alá csökkenjen? Az egyszerűség kedvéért számoljunk csak egyenes ütközésekkel!

b) Hogyan és miért kell megváltoztatni a reaktor aktív zónájában az üzemanyagrudak egymáshoz mért távolságát, ha a könnyűvíz-moderátort nehézvízre cseréljük?

c) Azonos számú üzemanyagrudat tartalmazó reaktorok esetén könnyűvízes vagy nehézvízes moderátorból van szükség nagyobb mennyiségre?

d) Milyen elhanyagolásokat végeztünk a feladat megoldása során?

Megoldás:

Vizsgáljuk meg az ütközésekkor a neutronok energiavesztését! A magok ütközését tekintjük egyenes, centrális és rugalmas ütközéseknek! Ez esetben felírhatjuk az energia- és lendületmegmaradás egyenleteit.

Jelöljük az ütköző neutron tömegét m -mel, az állónak vett fékező magok tömegét M -mel! Ekkor

$$\begin{aligned} p_m &= p'_m + p_M, \\ \frac{p_m^2}{2m} &= \frac{p'^2_m}{2m} + \frac{p_M^2}{2M}. \end{aligned} \quad (1)-(2)$$

Vezessük be a tömegek arányára az $M/m = x$ jelölést! Ekkor a fenti egyenleteket az alábbi alakra hozhatjuk:

$$\begin{aligned} p_m &= p'_m + p_M, \\ x p_m^2 &= x p'^2_m + p_M. \end{aligned} \quad (3)-(4)$$

A neutron ütközés utáni és előtti lendületének hányadosára vezessük be a $p = p'_m / p_m$ jelölést!

Ekkor a (3)–(4) egyenletekből kapjuk:

$$(1+x)p^2 - 2p + 1 - x = 0.$$

Ennek $p \neq 1$ triviálisról különböző megoldása:

$$p = \frac{1-x}{1+x}.$$

A neutronenergiák hányadosa:

$$\frac{E'}{E} = \left(\frac{p'_m}{p_m} \right)^2 = p^2 = q = \left(\frac{1-x}{1+x} \right)^2.$$

A neutron N számú ütközése után a neutron megmaradt energiahányada q^N lesz.

A közönséges víz esetén, amikor a neutron az azonos tömegű protonnal ütközik ($x = 1$) már az *első ütközéskor elveszíti teljes energiáját* (így a legalább 1%-ra való csökkenés teljesül).

A deuteronnal való ütközés esetén, ahol $x = 2$ -nek vehető $q = 1/9$, így a szükséges ütközések száma $N = 3$, hogy $q^N \leq 0,01$ teljesüljön.

b) Ha feltesszük, hogy a neutronok szabad úthossza (két ütközés között megtett út) ugyanakkora a közönséges, mint a nehézvízben, akkor nyilvánvaló, hogy messzebb kell helyezni egymástól az üzemanyagrudakat.

c) Ha ugyanannyi üzemanyagrudat használunk, akkor az előzőek alapján a reaktor mérete is sokkal nagyobb lesz, és természetesen több nehéz-, mint könnyűvízre van szükség.

d) Több elhanyagolást is tettünk a feladat megoldása során, amelyek közül jónéhány jelentősen módosítja az eredményt.

– Csak egyenes ütközéseket vettünk figyelembe, holott a valóságban az ütközések a háromdimenziós térben történnek, és ezért a neutronok diffúziós mozgást végeznek, és egy ütközéskor átlagosan kisebb energiát veszítenek, mintha csak egyenesen ütköznenek. Emiatt több ütközésre van szükség.

– Az ütközések között megtett utat (az átlagos szabad úthosszat) a neutronok és a szóró atommagok szórási hatáskeresztmetszete is befolyásolja. Ez lényegesen különböző protonra és deuteronra, sőt függhet a neutron energiájától is, ami persze lassulás közben változik. Könnyűvízben az átlagos szabad úthossz 3,7 mm, nehézvízben pedig 19,6 mm, azaz több mint ötször akkora. Emiatt nehézvízben a neutronok körülbelül ötször akkora utat kell megtegyenek – még ha ugyanannyit is kellene ütközzenek –, mint könnyűvízben.

9. feladat (kitűzte: Sükösd Csaba)

Egy téglalap oldalai L és $4L$. A téglalap úgy képes változtatni az alakját, hogy mindig téglalap maradjon, és a felülete is állandó. Erre a téglalpra három elektront helyezünk, majd engedjük, hogy az elektronok – az egyensúlyi állapot elérése érdekében – deformálják a téglalapot.

Mekkora lesz a téglalap oldalainak az aránya egyensúlyi állapotban?

Megoldás:

Az a és b oldalú téglalapba bezárt elektron állóhullámának komponens-hullámhosszai, -impulzusai és -energiatagjai:

$$n_x \frac{\lambda_x}{2} = a \rightarrow \lambda_x = \frac{2a}{n_x} \rightarrow p_x = \frac{h}{2a} n_x \rightarrow$$

$$\rightarrow E_x = \frac{p_x^2}{2m} = \frac{h^2}{8m} \frac{1}{a^2} n_x^2,$$

$$n_y \frac{\lambda_y}{2} = b \rightarrow \lambda_y = \frac{2b}{n_y} \rightarrow p_y = \frac{h}{2b} n_y \rightarrow$$

$$\rightarrow E_y = \frac{p_y^2}{2m} = \frac{h^2}{8m} \frac{1}{b^2} n_y^2.$$

Így a teljes energia:

$$E = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{n_x^2}{a^2} + \frac{n_y^2}{b^2} \right).$$

A Pauli-elv szerint alapállapotban 2 elektron tartózkodik, a harmadik pedig első gerjesztett (1 csomóvonalas) állapotban lesz. Így a bezárt elektronrendszer teljes energiája:

$$\begin{aligned} E_{\text{összes}} &= 2 \frac{h^2}{8m} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) + \frac{h^2}{8m} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{4}{b^2} \right) = \\ &= \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{a^2} + \frac{6}{b^2} \right) = \frac{3h^2}{8m} \left(\frac{b^2 + 2a^2}{a^2 b^2} \right). \end{aligned}$$

A felület állandóságából $ab = 4L^2$, azaz $b = 4L^2/a$, ezt behelyettesítve kapjuk:

$$E_{\text{összes}} = \frac{3h^2}{8m} \left(\frac{1}{a^2} + 2 \frac{a^2}{16L^4} \right) = \frac{3h^2}{8m} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{a^2}{8L^4} \right).$$

Első megoldás: deriválva a szerint kapjuk:

$$-\frac{2}{a^3} + \frac{2a}{8L^4} = 0,$$

amiből $a^4 = 8L^4$, azaz

$$a = \sqrt[4]{8} L = 1,682 L \text{ és}$$

$$b = \frac{4L^2}{\sqrt[4]{8} L} = \sqrt[4]{32} L = 2,378 L.$$

A téglalap oldalainak aránya tehát:

$$\frac{b}{a} = \frac{\sqrt[4]{32} L}{\sqrt[4]{8} L} = \sqrt[4]{4} = \sqrt{2}.$$

Második megoldás: A feladat deriválás nélkül is megoldható, ha használjuk a számtani és mértani középére vonatkozó – középiskolában is ismert – azonosságot:

$$\frac{x+y}{2} \geq \sqrt{xy},$$

és az egyenlőség (a minimum) feltétele: $x = y$. Legyen most $x = 1/a^2$ és $y = a^2/8L^4$. Ekkor a zárójeles kifejezésre kapjuk:

$$\left(\frac{1}{a^2} + \frac{a^2}{8L^4} \right) \geq 2 \sqrt{\frac{1}{a^2} \frac{a^2}{8L^4}} = \frac{1}{L^2 \sqrt{2}} = \text{konst.},$$

és minimumértékét akkor veszi fel, ha

$$\frac{1}{a^2} = \frac{a^2}{8L^4},$$

amiből természetesen visszkapjuk az

$$a = \sqrt[4]{8} L, \text{ és } b = \frac{4L^2}{a} = \sqrt[4]{32} L$$

értékeket.

A téglalap oldalainak aránya tehát:

$$\frac{b}{a} = \frac{\sqrt[4]{32} L}{\sqrt[4]{8} L} = \sqrt[4]{4} = \sqrt{2}.$$

A feladatkitűző megjegyzése: a középiskolában tanított folyadékcseppmodellben a folyadékcseppet a „felületi feszültség” mindig gömbbé igyekszik összehúzni. Ugyanakkor tudjuk, hogy csak a mágikus számú protont és/vagy neutronot tartalmazó atommagok gömbszimmetrikusak, az atommagok többsége alap-

állapotban is többé-kevésbé deformált. Ez a folyadék-cseppmodell alapján érthetetlen, ennek kifejezetten kvantummechanikai oka van. Az atommagokra érvényes háromdimenziós, gömbi koordinátákban számolható kvantummechanikai eset természetesen túl bonyolult lenne középiskolások számára, ám a feladatban szereplő kétdimenziós „téglalap” esete középiskolások számára is végigszámolható egyszerű esetben megmutatja, hogy hogyan vezet a „lezárt törzson” kívüli részecskék megjelenése az egész rendszer deformációjához. Az analógia a következő: deformáció közben a téglalap felszínének állandósága analóg az atommag térfogatának állandóságával 3D esetben (a maganyag összenyomhatatlan). A feladat feltételei mellett a leginkább szimmetrikus eset a négyzet lenne – ez felelne meg a gömb alaknak 3D-ben. (A kör természetesen még szimmetrikusabb 2D alakzat lenne, de a feladat matematikai kezelése túl nehéz lenne a középiskolások számára, ha nem csak téglalapokat, hanem általános síkidomokat kellene figyelembe venni.) Ha ugyanezt a feladatot két elektronra – vagy a 2D húrmodell egyéb „mágikus számára” – oldjuk meg, akkor az alapállapotú egyensúlyi alak valóban négyzet lesz. A mágikus számtól különböző részecskék esetén azonban deformált alakot kapunk – mint az a feladatban is látható.

10. feladat (kitűzte: Kis Dániel)

Legalább mekkora energiájú γ -fotonnak kell egy vízmolekulában lévő elektronon Compton-szórás szenvednie, hogy az így kirepülő elektron Cserenkov-sugárzást bocsásson ki?

Adatok: a víz törésmutatója $n = 1,33$. Az elektron kötési energiáját hanyagoljuk el!

Megoldás:

A Cserenkov-sugárzás feltétele, hogy a közegben mozgó elektron sebessége nagyobb legyen, mint a közegbeli fénysebesség. Így a vízmolekulából kilökött elektron sebességére kapjuk:

$$v \geq \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,33} = 2,26 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Az elektron minimális mozgási energiája pedig:

$$\begin{aligned} E_{kin} &= m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = \\ &= m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - 1 \right) = \\ &= 0,517 m_0 c^2 = 264 \text{ keV}. \end{aligned}$$

Az elektronon szórt foton akkor ad át legnagyobb energiát a meglökött elektronnak, ha az $\vartheta = 180^\circ$ -ban

viasszaszóródik. Ekkor a Compton-szórás képletéből adódik, hogy

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m c} (1 - \cos \vartheta) = \frac{2 h}{m c},$$

miel ebben az esetben $\cos \vartheta = -1$.

Fejezzük ki a hullámhosszakat E, E' energiákkal, majd azonos átalakítások után a keresett E fotonenergiára egy másodfokú egyenletet kapunk:

$$\begin{aligned} \frac{h c}{E'} - \frac{h c}{E} &= \frac{2 h c}{m c^2} \rightarrow \frac{E - E'}{E \cdot E'} = \frac{2}{E_0} \rightarrow \\ \rightarrow \Delta E \cdot E_0 &= 2 E \cdot E' = 2 E(E - \Delta E) \rightarrow \\ \rightarrow 2 E^2 - 2 \Delta E \cdot E - \Delta E \cdot E_0 &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow E^2 - \Delta E \cdot E - 0,5 \Delta E \cdot E_0 &= 0, \end{aligned}$$

ahol $\Delta E = E - E' = 264 \text{ keV}$ és $E_0 = m c^2 = 511 \text{ keV}$.

$$\begin{aligned} E_{1,2} &= \frac{\Delta E \pm \sqrt{(\Delta E)^2 + 2 \Delta E \cdot E_0}}{2} = \\ &= \frac{\Delta E}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2 E_0}{\Delta E}} \right). \end{aligned}$$

Itt csak a pozitív előjelet vesszük, hiszen a fotonenergia nem lehet negatív:

$$\begin{aligned} E &= 0,5 \cdot 264 \text{ keV} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 511 \text{ keV}}{264 \text{ keV}}} \right) = \\ &= 423,33 \text{ keV}. \end{aligned}$$

Legalább 423,33 keV energiájú ($\lambda \leq 2,93 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ hullámhosszú) fotonnak kell szóródnia a vízmolekulák elektronjain.

Junior (II. kategória) feladatai

Ezen a versenyen is, mint az első Szilárd-versenyen (valamint 2004 óta ismét) a junior kategória feladatai csak részben voltak azonosak az I. kategória (11–12. osztályosok) feladataival. Az utolsó két, a 9. és a 10. feladat más volt a fiatalabb versenyzők számára.

9. feladat (kitűzte: Vastagh György)

Egy pontszerűnek tekinthető radioaktív sugárforrás 3,2 mg ^{32}P izotópot tartalmaz. A foszfornak ez az izotópjá 14,3 nap felezési idővel, negatív β -bomlással bomlik.

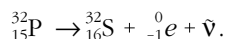
a) Mi lesz a leányelem?

b) Hány elektront számlál percenként a sugárforrástól 1 m távolságban elhelyezett β -detektor, ha annak felülete 10 cm^2 ?

(A detektor és a sugárforrás vákuumban van.)

Megoldás:

a) Bomlási séma:



A kezdeti bomlatlan atommagok száma:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{3,2 \cdot 10^{-3} \text{ g}}{3,2 \cdot 10^1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 6 \cdot 10^{19}.$$

Az aktivitás kiszámítása

$$A = \frac{\ln 2}{T_f} N = \frac{\ln 2}{8,64 \cdot 10^4 \cdot 14,3 \text{ s}} \cdot 6 \cdot 10^{19} = 3,366 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}} = 33\,660 \text{ GBq}.$$

A detektor percenkénti beütésszáma:

$$N = \frac{A t}{4 \pi r^2} \Delta f = \frac{3,3660 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{s}} \cdot 60 \text{ s}}{4 \pi \cdot 10^4 \text{ cm}^2} \cdot 10 \text{ cm}^2 = 1,607 \cdot 10^{11}.$$

10. feladat (kitűzte: Király Márton)

Egy könnyűvíz-moderátorú atomerőműben az üzemanyagban lévő ${}^{238}\text{U}$ egy része üzem közben ${}^{239}\text{Pu}$ -má alakul, és ez ugyancsak részt vesz a láncreakcióban az ${}^{235}\text{U}$ mellett. A kazetta élettartama végén a hasadások közel harmadáért már az üzem közben felgyűlt ${}^{239}\text{Pu}$ felel. Az üzemanyaghoz szükséges, 4%-ban dúsított urán 1 kg-jának előállításánál során 8,2 kg „szegényített” urán keletkezik 0,3% ${}^{235}\text{U}$ tartalommal. Az urán nagy sűrűsége miatt ($19,1 \text{ g/cm}^3$) ezt előszeretettel használják ólom helyett lőszerekben és páncéltörő lövedékekben.

a) Mennyi hasadási energia lenne kinyerhető egyetlen szegényített uránlövedékből, ha a benne lévő ${}^{238}\text{U}$ -t teljes egészében plutóniummá tudnánk alakítani?

b) Mennyi idő alatt szabadul fel ugyanennyi hasadási energia egy 500 MW villamos teljesítményű atomerőművi blokkban (például Paks) ha az energiaátalakítás hatásfoka 34%?

c) Hány lövedékből nyerhető ki annyi energia, amennyi egy év alatt Magyarország összes belső égésű motorjában felszabadul?

Adatok: egy nehéz atommag hasadásakor átlagosan 200 MeV energia szabadul fel. Egy 120 mm-es kinetikus lövedék 4,5 kg szegényített uránt tartalmaz. Magyarországon 2011. évben összesen 2,88 milliárd liter motorhajtó üzemanyag fogyott. A benzin és a gázolaj fűtőértéke 43 MJ/kg, sűrűségük átlagosan $0,8 \text{ g/cm}^3$.

Megoldás:

a) A lövedékben található uránatomok száma:

$$N = \frac{m}{M} N_A \cdot 0,997 \approx \frac{4,5 \cdot 10^3 \text{ g}}{238 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 1,134 \cdot 10^{25}.$$

A kinyerhető energia:

$$E = N \cdot 200 \text{ MeV} = 1,134 \cdot 10^{25} \cdot 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 3,63 \cdot 10^{14} \text{ J} = 363\,000 \text{ GJ}.$$

b) Mivel $P = W/t$, ezért

$$t = \frac{W}{P} = \frac{3,63 \cdot 10^{14} \text{ J}}{5 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \frac{1}{0,34}} = 2,4684 \cdot 10^5 \text{ s} \approx 68,56 \text{ h} \approx 2 \text{ nap és } 20,5 \text{ h}.$$

c) Felszabadult motorolaj-energia:

$$E = V \rho \epsilon = 2,88 \cdot 10^9 \ell \cdot 0,8 \frac{\text{kg}}{\ell} \cdot 43 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 99 \cdot 10^9 \text{ MJ} = 9,9 \cdot 10^{16} \text{ J}.$$

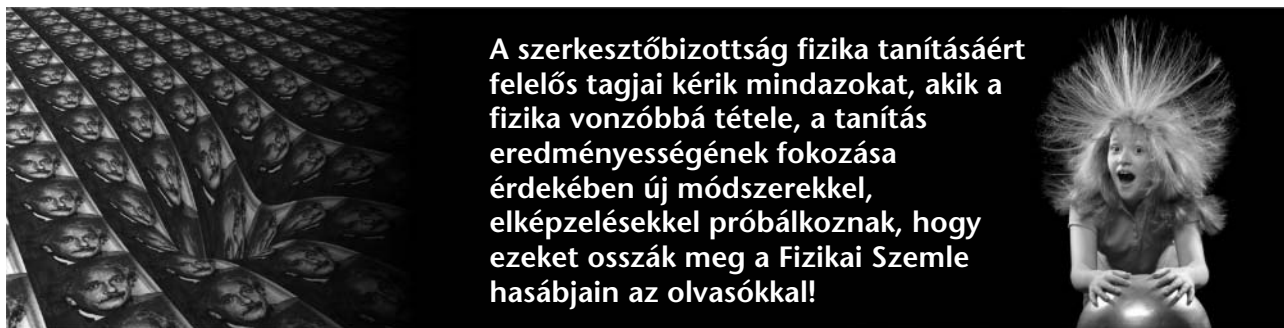
A lövedékek száma:

$$N = \frac{9,9 \cdot 10^{16} \text{ J}}{3,63 \cdot 10^{14} \text{ J}} \approx 273 \text{ db}.$$



A következő (befejező) részben a verseny számítógépes szimulációs, valamint kísérleti feladatát, továbbá a verseny értékelését mutatjuk be.

Végül ismertetjük a győzteseket, a díjazottakat és a támogatókat.



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!

EÖTVÖS-VERSENY 2013

2013. október 18-án, pénteken délután 3 órától este 8 óráig rendez meg az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az idei Eötvös-versenyt.

Azok a diákok vehetnek részt ezen a versenyen, akik vagy az idén (2013-ban) fejezték be középiskolai tanulmányaikat, vagy *most* is középiskolai tanulók. Nemcsak magyar állampolgárságú versenyzők indulhatnak, hanem Magyarországon tanuló külföldi diákok, valamint külföldön tanuló, de magyarul értő és beszélő diákok is, ha 2013-ban érettségiztek, vagy jelenleg is középiskolai tanulók.

A megoldásokat magyar nyelven kell elkészíteni; a rendelkezésre álló idő 300 perc. Minden segédeszköz használható, de mobiltelefont és laptopot a versenyre bevinni tilos!

Előzetesen jelentkezni nem kell, elegendő egy személyazonosság igazolására szolgáló okmánnyal (személyi igazolvány, fényképes diákigazolvány vagy útlevél) időben megjelenni a versenyen. A pontos helyszínekről, amelyek közt – idén először – valószínűleg külföldi is lesz, a *Fizikai Szemle* októberi száma és a Társulat honlapja ad majd pontos tájékoztatást.

Kérjük fizikatanár kollégáinkat, bátorítsák legjobb diákjaikat a versenyen való részvételre! Számos példa van arra, hogy az Eötvös-versenyen történő helyállás, az itteni sikeres szereplés indított el egy diákot későbbi sikeres életpályáján.

Mindegyik versenyzőnek eredményes munkát kívánunk!

Versenybizottság

HÍREK – ESEMÉNYEK

A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

DOFFI 2013, avagy fizikus doktoranduszok félig éles bevetésen

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2013. június 21–23. között rendezte meg – immáron másodszor – a Fizikus Doktoranduszok Konferenciáját (DOFFI) a hazai fizikus PhD hallgatók számára. Tavaly szerveztük meg az első próbajellegű Fizikus Doktori Konferenciát, és a sok jelentkező, illetve a kedvező visszhang megerősítette, hogy kitűzött céljaink helyesnek bizonyultak, ez pedig arra indított bennünket, hogy a tavalyi DOFFI-t ne egyszeri alkalomnak tekintsük, hanem egy rendszeres sorozat első eseményének.

Szándékunk szerint a DOFFI több célú rendezvény. Egyrészt lehetőséget szeretnénk nyújtani a doktorandusz hallgatóknak, hogy a nemzetközi konferenciákhoz hasonló helyzetben (szakmai közönség, elektronikus prezentáció, limitált időkeret, szakmai és laikus kérdések, konkurens párhuzamos programok, esetleg angol nyelvű előadás) beszámolhassanak tudományos témájukról és az eddig elért eredményeikről. Ugyanakkor ez a találkozó kitűnő alkalom lehet a hallgatóknak arra, hogy megismerjék egymás munkáját, kitekintést kapjanak a fizika más területeire is.

Nem titkolt szándékunk volt az is, hogy a fiatal fizikusok megismerjék az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot. Meggyőződésünk, hogy a hazai fizikus társadalomban a fiatal kutatók jelentősen hozzájárulhatnak a Társulat hatékonyabb, eredményesebb munkájához.

A Társulat olyan civil kezdeményezésnek tekinthető, amelynek céljait, jövőképét a tagjai formálják. Véleményünk szerint az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jövője nagyban függ a fiatal fizikusok szerepvállalásától (akik jelentős része korábban még nem is hallott az ELFT létezéséről, legfeljebb a *Fizikai Szemlével* találkozott hébe-hóba). Ha az új generáció megismeri a Társulat működését, céljait, belép, majd a saját képére formálja azt, akkor nem kell aggódnunk amiatt, hogy az ELFT reménytelenül beleragad a múlt századból itt maradt működési formák, rendezvények unalmas ismételtetésébe, nem veszi fel a 21. század tempóját, szokásait, és fokozatosan elveszti tagságát, közönségét. De ha az ifjak nem veszik át a stafétabotot, ez az aggodalom jogosnak bizonyulhat.

A szervezők elképzelése szerint a konferencia másik fontos küldetése, hogy hidat képezzen a doktoranduszok és a hazai cégek, kutatóintézetek között. Ezért több neves cég (Paksi Atomerőmű Zrt., Semilab Zrt., Morgan Stanley) képviselőjét hívtuk meg, hogy bemutassák munkájukat és a fizikus doktoranduszok szakmai lehetőségeit. E cégek – bár némelyik tevékenysége első látásra egészen messze áll a fizikától – számos fizikust foglalkoztatnak, és rendszeresen szemeztetnek az utánpótlásból. Vajon milyen erényekkel bírnak épp a fizikusok, hogy ennyire kapkodnak utánuk például a nagy pénzügyi tanácsadó cégek? Ezt



az információt létfontosságú megosztani a pályakezdő korosztállyal, az interdiszciplinaritás jövődjéi bajnokai, akik a következő évtizedekben új területeken öregbíthetik a magyar fizikusok jó hírét – már ha idejében értesülnek a lehetőségekről. A meghívott cégek egyben anyagilag is támogatták konferenciánkat.

Idén a támogató cégek közül csak a Morgan Stanley küldte el képviselőjét, régi tanítványunkat és kollégánkat, *Bihary Zsoltot*, aki az utóbbi években a pénzügyi elemzések és előrejelzések területén kama-toztatja statisztikus fizikai tudását és ötleteit. Ő (akár-csak tavaly) egy igen érdekes és lelkesítő előadás keretében mutatta be egy nehéz pénzügyi probléma megoldási algoritmusát, ismét igazolva a régi mon-dást: „Fizika az, amivel a fizikusok foglalkoznak.”

A doktoranduszi és szponzori előadások mellett célunk az is, hogy néhány plenáris előadás keretében megismertessük a résztvevőket a fizika legújabb ered-ményeivel, az aktuális forró témákkal. Ebben az év-ben *Csonka Szabolcs* (BME) beszélt a nanoelektronika-ról, *Benedict Mihály* (SZTE) a legutóbbi fizikai No-bel-díjasok tevékenységéről, az egyedi kvantumob-jektumok megfigyeléséről és manipulálásáról, végül *Kürti Jenő* (ELTE) napjaink két csodaanyaga, a szén nanocsövek és a grafén Raman-spektroszkópiájáról.

Külön megtiszteltetés volt számunkra, hogy a kon-ferencia fővédnöki tisztét *Pállinkás József*, a Magyar Tudományos Akadémia elnöke vállalta el. A konfe-renciát *Zawadowsky Alfréd*, az ELFT új elnöke nyitotta meg és *Kroó Norbert*, a Társulat leköszönő elnöke zárta be. Mindketten meleg szavakkal méltatták a ren-dezvényt, kifejezték bizalmukat az ifjú fizikus generá-cióban, és néhány jótanáccsal is ellátták a résztvevő-ket. A rendezvény főszervezője *Cserti József*, az ELFT főtitkár-helyettese volt, a pénzügyi és technikai lebo-nyolítást *Nagy Zsigmondné*, az ELFT ügyvezető titká-ra, az elektronikus szervezést *Koltai János*, az egyéb szervezési munkákat *Király Andrea* és *Dávid Gyula* vállalta. Szekcióelnökként segítette munkánkat *Szabó István* (DE), *Újfalussy Balázs* (Wigner Központ) és *Bihary Zsolt* (Morgan Stanley) is.

A konferencián részt vettek a Doktoranduszok Or-szágos Szövetségének képviselői, nevükben *Csiszár Imre* beszélt a szervezet céljairól, feladatairól, terveir-

ről. Este a jelen lévők jelentős részének akaratából meg is alakult a DOSZ Fizika Tudományos Osztálya, és azon nyomban meg is kezdte a munkát.

Az idei DOFFI-n több mint ötven doktorandusz vett részt, közülük 46-an tartottak előadást. Ezzel már-már a konferencia időbeli tűrőképességét feszegettük – több előadást szinte lehetetlen belezsúfolni a két és fél napos időkeretbe, legfeljebb az ebéd, az éjszakai alvás vagy a kora délutáni strandolás rovására. Ha a résztvevők száma továbbra is ilyen örvendetesen emelkedik, jövőre három és fél napos DOFFI-t kell szerveznünk. Próbálkozhatnánk persze a nagy konfe-renciák mintájára párhuzamos szekcióülésekkel is (ehhez esetleg másik, több előadóteremmel rendelke-ző helyszínt kellene keresnünk). Ez azonban vélem-nyünk szerint ellentmondana a konferencia egyik alapvető céljának, nevezetesen annak, hogy a résztve-vő doktoranduszok lássanak ki saját szűkebb szakte-rületük merev bástyafalai közül, és a lehető legszele-sebb merítéssel ismerjék meg, mivel is foglalkoznak kortársaik, ifjú kollégáik szerte az országban.

Az idei konferencia kellemes meglepetése volt, hogy az előadások színvonala jelentősen javult a tava-lyihoz képest. Az első DOFFI gyakori élménye volt, hogy a szekcióülés levezetője kénytelen volt a kisza-bott időkeret leteltével erőszakkal leállítani az aktuális előadót, aki még csak a téma felvázolásánál, a száz évvel ezelőtti előzményeknél, jobb esetben témaveze-

A jó előadás jutalma: taps.





A parton egy fotós iskola résztvevőivel osztoztunk.

tője évtizeddel ezelőtti munkásságánál tartott, és eszé ágában sem volt rátérni saját eredményeire. Többen meg is sértődtek, hogy ilyen fontos információk átadására nem kapnak kétszer annyi időt, mint mások. Pedig a nemzetközi tudósvilág törzsi szokásai könnyörtelenek, a chairman általában csípőből lő, és ehhez jobb minél előbb – jelesül egy DOFFI-hoz hasonló, halálos tét nélküli, de a valódihoz hasonló lebonyolítású konferencián – hozzászokni. Örömmel jelentjük, a résztvevők nagy része hozzászokott! Idén gyakorlatilag nem kellett senkit sem leállítani, majdnem mindenki belefért a kiszabott időbe, és azon belül is jól gazdálkodott az idejével, jól osztotta be mondanivalóját. Tavaly azon is sokat kellett bosszankodnunk, hogy sokan a minél hatékonyabb információátadás helyett a grafikai trükkökre, felesleges vizuális cafrangokra fordították energiájukat, így születtek a sárga alapra rózsaszín, ráadásul folyóírást utánozó miniatűr betűtípussal készült fóliák, hasonlóan miniatűr képletek tömegével megspékelve – ezeket már a nézőtér második sorából sem lehetett elolvasni. Idén ez is másképp volt, a bemutatott prezentációk nagy része informatív, jól olvasható, szöveget, képleteket és ábrákat megfelelő méretben, színben és megfelelő arányban tartalmazó anyag volt. Egy év alatt a doktoranduszok megtanultak előadni – vagy csak egyszerűen komolyabban vették a feladatot, több időt és energiát fordítottak rá. Akármelyik eset valósult meg, a DOFFI máris elérte egyik célját. Az így készült előadások információanyaga átment a rivaldán, a témát közelebről nem ismerő hallgatók jelentős része is

megértette azt, és megtudta, mivel foglalkozik tanult kollégája. Erre utaltak az előadások után feltett érdeemi, szakmába vágó kérdések is. És ki tudja, hány jövőbeli intra- és interdiszciplináris együttműködés csírája született meg az előadások közti szünetekben folytatott diszkussziók során.

Teljesen megelégedve természetesen senki sem lehet. Sem a saját, sem a mások előadásával. A résztvevőknek azt ajánljuk: még gondosabban, még pontosabban gazdálkodjanak az idővel, előre, otthon próbálják el az előadást, közben mérjék az időt, kérjék ki és fogadják meg a prezentációt meghallgató barátaik, kollégáik véleményét. Érdemes az előadott anyag irodalmi előzményeit felkutatni, és a linkeket szerepeltetni a prezentációban. Mindezek előadására nincs idő, de ha a téma iránt mélyebben érdeklődők később megkeresik az előadás anyagát a DOFFI weblapján, a linkek alapján könnyebben kezdhetik a tájékozódást.

A tavalyi és idei DOFFI-n előadott prezentációk anyaga (kivéve a szerzői joggal védetteket) megtekinthető a rendezvény weblapján: <http://doffi.elte.hu>. Ugyanitt fotógaléria is várja az érdeklődőket, bemutatva a rendezvény helyszínét, résztvevőit és jellegzetes pillanatait.

A DOFFI-t Balatonfenyvesen, egy hatvanas évekből itt felejtett, kissé szocreál hangulatú, de nagyon kedves és kényelmes (azaz a huszonéves fiatalok kényelmi igényeinek megfelelő) – és ami a legfőbb, közvetlen Balaton-parti stranddal rendelkező – ifjúsági üdülőben rendeztük meg (akárcsak tavaly). A program nemcsak tömény tudományból állt, a délutáni szünetet és a langyos estét a résztvevők nagy része a kellemesen meleg vízben töltötte. Szombat este az égiek extra hang- és fényjátékkal is szolgáltak: a Nemzetközi Űrállomás átvonulását két fényes Iridium-villanás, egy kettészakadó zöld tűzgömb, majd a szemközti partot jégesővel elborító, egész estés vihar vakító állományai követték, a mögöttünk ragyogó telehold által kísértetiesen megvilágított, száguldó viharfelhők, a tomboló szél, és a viharban ijesztően forrónak tűnő Balaton hullámverésének kíséretében. Az éjszaka későbbi óráit pedig az ország különböző részeiből érkezett doktoranduszok baráti beszélgetése és sörözése töltötte ki, amit csak néha szakított meg egy-egy hangos kacagás, amikor valaki oktatóit utánozta... Az utánzóttak egyike épp erre a kacagásra ébredt, és az első percekben nem is tudta eldönteni, hogy ő most tulajdonképpen itt fekszik az ágyában, vagy kint beszélget a hallgatókkal, hiszen odakintről is a saját hangját hallotta.

Reméljük, jövőre el fogja dönteni a kérdést, hiszen – mint az azóta lefolytatott közvélemény-kutatás döntő többséggel megszavazta – a DOFFI jövőre is folytatódik, hasonló célokkal, hasonló stílusban, ugyanezekkel és újonnan jelentkező fiatalabb résztvevőkkel. Reméljük: hasonlóan eredményesen és hasonlóan jó hangulatban.

A szervezők nevében:
Dávid Gyula és Cserti József

Mérföldkőnek minősítette az IEEE a holográfia felfedezését

2013. június 12-én ünnepi workshop keretében *mérföldkővet* állított az IEEE.¹ A holográfia felfedezését méltató ünnepi ülés Londonban, az Imperial Collegeban tartották, ahol *Gábor Dénes* – emigrálása után – 1948-tól 1967-es nyugdíjazásáig az Elektronfizika Tanszék professzora volt.

A szemináriumot követte a Gábor Emlékelőadás, majd a londoni Imperial College falán, a Department of Electrical and Electronic Engineering (DEEE) bejáratánál leleplezték a Gábor Dénes által 1947-ben felfedezett holográfiának szentelt emléktáblát.

Az elhangzott előadások *Peter Cheung*, a DEEE vezetőjének elnökletével:

Peter C. J. Hill (Cranfield Egyetem, Gábor Dénes tanítványa és barátja): Gábor Dénes élete, munkássága, személyisége

Robin Smith (Imperial College, London): A Gábor Dénes által felfedezett holográfia, mi az, mire használható?

Martin J. Bastiaans (Eindhoveni Műegyetem, IEEE R8 vezetője): A Gábor Dénes-féle idő-frekvencia jel kiterjesztése

David N. Payne (Southamptoni Egyetem): Fény, lézerek és az internet

L. Solymar (Oxfordi Egyetem, 2013. évi Gábor-előadás): Gábor Dénes élete és kora

A Magyar Tudományos Akadémia nevében *Gyulai József* akadémikus, a Hazai és Nemzetközi Gábor Dénes-díj kuratóriumának elnöke levélben méltatta Gábor Dénes tevékenységét és köszöntötte az ünnepi ülészak résztvevőit.

Az alábbi szövegű „mérföldkő” emléktáblát *Peter Staecker*, az IEEE elnöke leplezte le.

„IEEE mérföldkő a villamosmérnöki tudomány és számítástechnika területén. A holográfia felfedezése – 1947. 1947-ben Gábor Dénes az elektronmikroszkóp teljesítményének növelése érdekében rátalált a hullámfront-rekonstrukció eszméjére. Ez lett az alapja a háromdimenziós leképezéshez vezető optikai holográfia felfedezésének, de a megvalósításhoz koherens fényforrásokra volt szükség és meg kellett várni a lézer néhány évvel későbbi megjelenését. Gábor 1971-ben e felfedezéséért Nobel-díjjal tüntették ki.”

Csurgyáné Ildikó, PPKE ITK

¹ Az IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) eredetileg villamosmérnököket egyesítő nemzetközi szervezet. Taglétszáma 2013-ban meghaladja a 425 000-t, 160 országban vannak tagegyesületei, a legnagyobb szakmai súllyal bíró, legrégebben alakult egyesület. Az 1840-es évektől kezdve a közlekedésnél gyorsabb kapcsolatot teremtő távirás (*Norvin Green*), az elektromos világítás (*Thomas Edison*), a telefon (*Alexander Graham Bell*), valamint a váltóáramú indukciós motor és nagyfeszültségű távvezeték megjelenésével (*Nikola Tesla*) az elektromosság a társadalom fontos erőforrásává kezdett válni. 1884 tavaszán New Yorkban az alapító *Norvin Green* mellett néhányan kezdeményezték egy olyan szervezet létrehozását, amely a születőben lévő területek szakértőit támogatja, elősegíti, hogy felfedezéseik az emberiség javát hatékonyan szolgálják.

Mekkora a foton élettartama?

A foton – a fény vagy az elektromágneses sugárzás kvantumát – normális körülmények között zérus tömegűnek tételezik fel. Bizonyos elméletek azonban megengedik, hogy a fotonnak legyen egy kis nyugalmi tömege, amelynek következtében elbomolhat könnyebb elemi részecskékre. Ha tehát egy ilyen bomlás lehetővé válna, mekkora lenne a foton élettartama? Ezt a kérdést tette fel Németországban egy fizikus, aki kiszámította, hogy a foton élettartamának alsó határa a saját vonatkoztatási rendszerében három év lenne. Ez az érték a mi vonatkoztatási rendszerünkben nagyjából egy trillió (10^{18}) évnek felel meg.

Azt az ötletet, hogy a fotonnak véges élettartama, ennél fogva tömege van, nehéz elképzelni. A csillagászok, akik rendszeresen figyelnek meg távoli kozmikus objektumokat, olyan fotonokat detektálnak, amelyek sokmilliárd évesek. Bizonyos elméletek azonban azt sejtetik, hogy a fotonnak nem zérus, bár igen kicsi nyugalmi tömege lehet – a foton tömegének felső határa, hála az elektromos és mágneses terekkel végzett kísérleteknek, az adatok szerint 10^{-18} eV vagy

10^{-54} kg. Ezzel a kis tömeggel azonban a foton elbomolhat könnyebb elemi részecskékre, mint például a legkönnyebb neutrínó-antineutrínó párra, vagy olyan részecskékre, amelyek még nem ismertek és túlmutatnak a részecskefizika Standard Modelljén.

Julian Heeck, a heidelbergi Max Planck Institute for Nuclear Physics fizikusa kozmológiai megfigyelésekben kereste a foton bomlásának jeleit (*Phys. Rev. Lett.* 111 021801). A mikrohullámú kozmikus háttérsugárzást (CMB), az Ősrobbanás maradványait vizsgálta, amelyek akkor jöttek létre, amikor az Univerzum még nagyon fiatal – mintegy 380 000 éves volt.

Kezdetben az anyag és a sugárzás szoros csatolásban voltak. Amint azonban az Univerzum az „inflációnak” nevezett, rendkívüli nagy növekedési perióduson keresztülment és kitágult, az elektronokból és könnyű magokból álló forró plazma eléggé lehűlt ahhoz, hogy kialakulhassanak a semleges atomok. Az anyag és sugárzás „lecsatolódása” hirtelen lehetővé tette, hogy a fotonok szabadon mozoghassanak az Univerzumban. Az idő múlásával – az Univerzum

tágulása miatt – hullámhosszuk megnövekedett, és a spektrum mikrohullámú részében enyhe sugárzást – homogén fekete test hőszugárzás kibocsátását eredményezte a tér minden irányába, amit ma detektálni tudunk.

Több mint száz kísérletben tanulmányozták a CMB-t, mióta felfedezték, beleértve a NASA Cosmic Background Explorer (COBE) műholdját, a Wilkinson Microwave Anisotropy Probe-ot (WMAP) és legutóbb az Európai Űrügynökség Planck Misszióját, amelyek mindegyike rendkívüli pontossággal mérte ezt a sugárzást. Valójában a CMB-spektrum a természetben eddig mért legpontosabb feketetest spektrum. Ezt a spektrumot használta Heeck a számításaiban – rendkívül pontos adatokat használt fel a COBE misszióból és összehasonlította azokat a saját számított spektrumával, amelyekben figyelembe vette a foton bomlását.

Ha a fotonnak tömege van és könnyebb részecskékre bomlik, akkor a CMB-ben a fotonok sűrűsége

növekedik, amint a fotonok terjednek. Ez azonban azt jelenti, hogy a CMB-spektrum többé nem illik rá a megfigyelt, majdnem tökéletes hőmérsékleti görbére. Heeck érvelése szerint, minthogy a CMB majdnem tökéletes fekete test, nagyon kevés foton – ha egyáltalán – bomlott el az Univerzum 13,8 milliárd éves létezése alatt, ezért a CMB-mérések korlátot szabnak a foton élettartamának.

A tömegre vonatkozó és a CMB-korlátok kombinációjának használatával Heeck kiszámította a foton élettartamát saját vonatkoztatási rendszerében, amelyre 3 év adódott. Minthogy azonban ezek a kis tömegű fotonok közel fénysebességgel mozognak, az idődilatációt figyelembe kell venni, ez pedig az élettartamra 10^{18} évet eredményezett a mi vonatkoztatási rendszerünkben. E korlát tökéletesítése azonban igen nehéz lesz, amíg újabb vizsgálatok nem adnak több információt a korai Univerzusra.

<http://physicsworld.com>

HÍREK ITTHONRÓL

Huszonöt éves a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

„Mi, mint az alapító közgyűlés résztvevői, ezennel megalapítjuk a MAGYAR FIZIKUS HALLGATÓK EGYESÜLETÉT”,¹ majd 137 aláírás és a dátum: Budapest, 1988. szeptember 28. Ez olvasható abban a jegyzőkönyvben, amelynek következményeként megalakult az ország egyik legrégebbi, ugyanakkor rendszeresen megújulni képes hallgatói civil szervezete. Az immár negyed évszázada folyamatosan működő egyesület célja az évek során semmit sem változott: igyekszik összefogni és segíteni a magyarországi fizikushallgatókat és mindazokat, akik országunkban fizikával kapcsolatos felsőfokú tanulmányokat folytatnak.

De hogyan is jutott el az idén fennállásának 25. évfordulóját ünneplő egyesület idáig? Az ötlet néhány fizikushallgató fejében fogant meg 1986 tavaszán. *Lévai Péter*, *Ván Péter* és *Budai Patroklosz* világítottak rá arra a problémára, hogy a modern kutatáshoz és a fizika műveléséhez nem elegendő felkészülés az egyetemi tananyag elsajátítása és a vizsgákon való beszámolás. A kutatói munkára való felkészülésnek ez csak egyik eleme, hiszen hasonlóan fontos a tudomány nemzetközi „kölcsonhatásába” való bekapcsolódás is. Az egyetemi oktatásban ez a gondolat a legkisebb mértékben sem jelent meg, ezért összeültek és kigondolták, hogyan lehetne a fizikushallgatókat felkészíteni erre a kutatásban olyannyira fontos „kölcsonhatásra”. A megoldáshoz az aktív kutatók példáját vették alapul.

¹ Az egyesület neve nem sokkal később Magyar Fizikushallgatók Egyesületére változott, rövidítésének helyes írásmódja magyarul és angolul egyaránt: Mafihe.

Az alapgondolat egy nemzetközi fizikus diákkonferencia létrehozása volt, ahol fizikushallgatók bemutatgatják egymásnak érdeklődési területüket, illetve akár szakmai kapcsolatba is kerülhetnek. Az előadó diákok ily módon szembesülhetnek azzal a korántsem egyszerű feladattal is, hogy miként kell mondanivalójukat tömören és hatásosan előadni a nemzetközi közönség számára. A kutatók egy másik érintkezési lehetősége, ha egy ideig egymás intézeteiben dolgoznak együtt. Ennek kézenfekvő, „hallgatói léptékű” analógiáját jelentette a külföldi nyári gyakorlatok megteremtésének lehetősége, amelyek segítségével számos hallgató juthatott el külföldre, és építhetett ki kapcsolatrendszert.

Az ötlet gyakorlati megvalósítására sem kellett sokat várni. 1986 októberében a fenti három hallgató és *Horváth Ákos* megszervezte Budapesten a fizikushallgatók első nemzetközi konferenciáját, az ICPS'86-ot (International Conference for Physics Students). Nyolc európai ország képviseltette magát, a két tucat diákelőadás mellett számos híres magyar kutató is részt vett a szakmai programban. A találkozón a résztvevők megvitatták a nemzetközi együttműködés lehetőségeit, és szorgalmazták egyéb szakmai rendezvények szervezését. Ezen felül megállapodtak arról is, hogy a konferencia éves rendszerességgel megrendezésre kerüljön. 1987-ben Debrecen adott otthont a konferenciának. Itt már 14 nemzet képviseltette magát. A szakmai programok mellett a résztvevők megalapították a Fizikushallgatók Nemzetközi Egyesületét, az IAPS-et (International Association of Physics Students), elfogadták az alapító okiratot és az alapszabályt.

A nemzetközi szervezet megalakulása után a munka kettévált. Az IAPS elnöke Budai Patroklosz lett, aki megkezdte az egyesület nemzetközi vérkeringésbe való bevezetését. Hárman pedig a magyarországi nemzeti szervezet megteremtésén kezdtek el dolgozni. Ezt a munkát koronázta meg a cikk elején idézett nyilatkozat.

Az első évek legégetőbb problémája a magyar hallgatók külföldi tapasztalatszerzési lehetőségeinek hiánya volt. A Mafihe akkor azt a korántsem egyszerű feladatot vállalta magára, hogy szervezett nyári cseregyakorlatokat és kultúrccsere-lehetőségeket teremtett a magyar diákok számára. Már az első évtől kezdve kapcsolatot tartott a nemzetközi csereprogramokkal foglalkozó diákszervezettel, az IAESTE-vel, valamint több külföldi, illetve magyar intézménnyel is, annak érdekében, hogy tagjai a lehetőségek minél szélesebb tárházából választhassák ki a számukra kedvező témát és helyet. Másrészt fontos volt, hogy külföldi kollégáink is egyre több intézmény közül választhassanak magyarországi gyakorlataik során. A sikeres közreműködésnek hála a kilencvenes évek elején több mint száz magyar fizikushallgató juthatott el nívós nyugat-európai létesítményekbe: többek között Heidelbergbe, Prágába, Helsinkibe volt lehetőségük kiutazni a csereprogramokon részt vevő hallgatóknak, de Angliában vagy éppen Egyiptomban is végezheték gyakorlataikat a jelentkezők.

Fennállásának első éveiben a Mafihe elsődleges profilját az internacionális kapcsolatrendszer kiépítése jelentette, ugyanakkor az egyesület a kezdetektől a mai napig döntő szerepet játszik a különböző magyar egyetemeken hallgató fizikusok szakmai és kulturális kapcsolatainak ápolásában. Megalakulásától kezdve úgynevezett Helyi Bizottságokat működtet Budapesten (ELTE), Szegeden és Debrecenben, 1995 óta pedig a Műegyetemen is. Elmondható tehát, hogy a legtöbb olyan egyetemen jelen vagyunk, ahol a nívós fizikaoktatás lelkes hallgatósággal találkozunk. A Helyi Bizottságok nélkülözhetetlen egységei a Mafihe-nak, mivel közvetlen kapcsolatot jelentenek az országos szervezet és a hallgatók között. Azonban távolról sem tekinthetők csupán az egyesület szócsövének, a helyi igények tudatában saját programokat szerveznek, és a legtöbb egyetemen szerepet vállalnak a helyi felsőfokú fizikaoktatás fejlesztésében is. Az országos programok lebonyolítása mellett nekik köszönhető például a budapesti Fizikus TDK Hétféje, ahol a hallgatók megismerkedhetnek olyan aktív fizikusokkal, akik diplomázni vagy TDK-zni vágyó fiatalokat keresnek egy-egy kutatási témához, vagy épp teaházakat, előadóköröket szerveznek, ahol oktatók és diákok kötetlen, családias légkörben mutatják be egymásnak munkájukat. Számos Helyi Bizottságunk vállalja a tudomány népszerűsítésének misszióját is, egyetemi nyílt napokon és fesztiválokon próbálja a fizika és a természettudományok irányába terelni a fiatalságot. Ezen felül természetesen a fizikus közösség építése érdekében számos kulturális programot is szervez.



NYIFFF közben nincs nyaff (2009. május).

A kilencvenes évek második felétől jelentősen könnyebb lett külföldön tanulni, dolgozni, a kiutazás önállóan is megvalósíthatóvá vált. Egyéni cseregyakorlatok szervezése helyett a Mafihe csoportos tanulmányutak és kultúrccserek rendezésével segítette a fizikushallgatókat abban, hogy a határainkon kívüli kutatási tevékenységgel ismerkedjenek, és felvehessék a kapcsolatot európai diákokkal. Az évek során közel egy tucat ország egyetemével szerveztünk csoportos kultúrccsereket. Néhány év kihagyás után idén ismét lesz Mafihe csere: a JDPG német diákszervezettel közös szervezésben ősszel német hallgatók látogatnak el Magyarországra, hogy megismerkedjenek az itthoni kutatóintézetek munkájával. A program második felében, 2014 tavaszán pedig húsz magyar fizikushallgatót fogad majd az LMU München.

A nemzetközi kapcsolatépítés másik ága az ICPS konferencia „vándorútra indításában” valósult meg. A rendezvényt minden évben más-más európai városban rendezik meg a helyi fizikushallgatók. Egyesületünk tagjai évről-évre képviselik magukat a nemzetközi találkozón, így számos fizikushallgató tapasztalhatta meg egy külföldi konferencia élményét. Az első két, korábban már említett ICPS-en kívül Magyarország, illetve a Mafihe háromszor nyerte el a rendezés jogát, ezzel is jelezve, hogy a magyar fizikushallgatók aktivitása európai viszonylatban is kimagasló. Az 1996-os szegedi és a 2002-es budapesti konferencia sikereit követően legutóbb 2011-ben hárult magyar szervezőkre az örömteli, ám cseppet sem könnyű feladat, hogy összehívják ezt a világviszonylatban is egyedülálló találkozót, ezúttal ismét Budapesten. A három főszervező (*Szécsényi István, Lakatos Dóra és Ferdinandy Bence*) és több mint húsz segítő szervező munkájának köszön-

hetően a 400-nál is többen vehettek részt az egyhetes konferencián, a hallgatói prezentációk száma meghaladta a százat, ezen felül pedig négy neves magyar származású kutató és a Nobel-díjas *Carlo Rubbia* vendéglődését hallgathatta végig a közönség.

A Mafihe komoly hangsúlyt helyez olyan (esetleg már megalapítása előtt is létező) magyarországi programok szervezésére és támogatására, amelyek a fizikushallgatók fejlődését segítik elő. Emellett 1992 óta ápolja és jelenteti meg a *Mafigyelő* nevű ingyenes, időszakos folyóiratot, amely évente négy-öt alkalommal 500 példányban jelenik meg. A folyóirat elektronikusan is olvasható a *mafibe.hu* oldalon (a korábbi számok digitalizálása jelenleg is folyamatban van).

Az ifjú fizikusok számos versenyen mérhetik össze tudásukat és kreativitásukat. A Mafihe, az ELTE oktatóival és az Eötvös Loránd Fizikai Társulattal együttműködve, megalapítása óta minden év őszén részt vesz az Ortvay Rudolf Nemzetközi Problémamegoldó Verseny megszervezésében. A mintegy 30-40 kitűzött feladat közül legfeljebb 10-et lehet beküldeni, a megoldási idő tíz nap. A kitűzött feladatok nem az iskolás jellegű feladatmegoldó rutint, hanem a fizikai gondolkodás, probléma-felismerés, a megfelelő matematikai eszközök megválasztásának képességét mozgósítják. Ez a patinás, immár 44 éves verseny méltán tekinthető a fizika iránt érdeklődő ifjúság egyik legnívósabb megmérettetésének. Az évek folyamán számos magyar és külföldi kutató ért el kimagasló eredményeket ezen a kihíváson egyetemi éve alatt. Az idei évben nagyjából fele-fele arányban születtek magyar és külföldi eredmények.

A levelező verseny az önálló feladatmegoldó képességet méri fel, azonban a modern kutatás megkívánja a csapatmunkát is. Ez a tulajdonság, a közös problémamegoldás az egyetemi oktatásban nem jelenik meg relevánsan. Ezért a Mafihe *Dávid Gyula* egyetemi adjunktus irányításával és a verseny oktatói/doktorandusz zsűrijének közreműködésével évente rendez meg a

Két iszákos hóember... (Téli Iskola, 2010. február)



Nyílt helyi Fifiqs Fiziqs Feladatok (NYIFFF) elnevezésű többnapos csapatversenyét. Az 1993-ban útjára indított erőpróba kreatív és nem ritkán humoros feladatokkal teszi próbára a 3-5 fős csoportok intelligenciáját és fizikai érzékét. A többnyire május első hétvégéjén megrendezésre kerülő verseny elméleti, konstrukciós és prezentációs feladatokkal hoz úde színfoltot a félév végi zárthelyik egyhangúságába. A NYIFFF létjogosultságát és meghatározó szerepét szemlélteti, hogy a verseny eddigi 20 éve alatt számos olyan életszerű problémával foglalkozott, amelyek később további tudományos kutatásra ösztönözték a résztvevőket, a korábbi évek győztesei pedig gyakran zsűritagként térnek vissza.

A fizikus szemlélet és a csapatmunka mellett elengedhetetlen, hogy egy felkészült kutató képes legyen közérthetően elmondani gondolatait, közvetíteni tudományos eredményeit. Ez a tény sarkalta arra egyesületünket, hogy elindítsa a Mafihe Országos Előadó Versenyt (MOEV). Ez, ahogy a nevéből is kiderül, a kommunikációs készség próbája. A versenyzőknek legfeljebb 15 percben kell bemutatniuk egy általuk választott témát a közönségnek és persze a zsűrinek. A verseny során tehát lehetőség nyílik arra, hogy a résztvevők tökéletesítsék előadásmódjukat (TDK versenyekhez, konferenciákhoz), de az előadás témája nincs megkötve. A szakértőkből (jellemzően fizikusokból) álló zsűri itt csakis az előadás módját és a versenyzők rátermettségét értékeli. A díjak mellett az itt szerzett tapasztalatok és tanácsok is hozzájárulhatnak egy konferencián tartott előadás vagy céges interjú sikeréhez.

A korábban említett kompetenciák mellett azonban a fizika megismerése és a jövő szempontjából fontos tudásanyag elsajátítása elengedhetetlen a kutatásban és a civil szférában dolgozó fizikusok számára. Az egyetemi tananyag mélyebb megértéséhez és speciális vagy új eredményeket felmutató területek bemutatásához kínálunk lehetőséget a Mafihe Iskolákkal.

A Mafihe Téli Iskola a vizsgaidőszak végén egy hosszú hétvégét ölel fel, míg a Balatoni Nemzetközi Nyári Iskola (Balaton Summer School, BSS) egy egész hetes tanulságos és szórakoztató program július első heteiben. Ezek a programok neves oktatók, kutatók előadásait hallgathatják meg a résztvevők, a közösségi programokon pedig a kutatókkal való kötetlen beszélgetésekre is lehetőség nyílik.

A Nyári Iskolán hagyományosan több témakörben, egymással párhuzamosan zajlanak előadások, a nemzetközi társaság és a gyakorlás miatt jellemzően angol nyelven. Ez a többszekciós, nemzetközi szintű konstrukció 2009 óta működik. Az utóbbi pár évben többek közt a biofizika, orvosi fizika, asztro-részecske fizika, hálózatok fizikája, kondenzált anyagok fizikája, nanofizika és asztrofizika legfrissebb eredményei kerültek bemutatásra, de számos alapozó előadásra is sor került az említett témákban. Az egyhetes időtartam lehetőséget ad arra, hogy az előadásokon kívül különböző szabadidős programokon vehessenek részt a hallgatók, az egyik napot pedig teljes egészében fenntartjuk a közös kirándulásra.

A Téli Iskola egy, az adott évben kurrens témakört tárgyal alaposabban. Tavaly februárban például a lézerek fizikájával ismerkedtünk. A Szegeden rendezett iskolán hangsúlyos szerep jutott a városba tervezett nagyszabású kísérletnek, az ELI-nek (Extreme Light Infrastructure) is. Idén a részecskefizikával foglalkozott az iskola, amely a Higgs-bozon létezésére utaló kísérleti eredmények, a Nagy Hadronütköztető (LHC) szünete és a Budapestre tervezett kulcsfontosságú („Tier-0”) LHC Grid adatközpont miatt különös aktualitással bír. A több mint 80 fős hallgatóság a CERN, az MTA Wigner FK, az ELTE, a BME és a debreceni ATOMKI magyar kutatóitól ismerhette meg a részecskefizika elméleti hátterét és nagy kísérleteit.

Egy jó Nyári vagy Téli Iskola egyszerre tanít és szórakoztat, ráadásul a résztvevők megismerkedhetnek más egyeteméről jött fizikusokkal – nyáron akár külföldi diákokkal is. Mindezen kritériumokat egyszerre teljesíti az egyesület egyik legnagyobb volumenű rendszeres programja, a CERN Kirándulás. Minden év márciusában az ország hat intézményéből (BME, DE, ELTE, NYF, PTE, SZTE) és a kolozsvári BBTE-ről érkeznek fizikushallgatók, hogy részt vegyenek a programon. Az ötnapos külföldi tanulmányút keretében meglátogatjuk a svájci–francia határon fekvő intézetet, amelyet magyar és külföldi kutatók mutatnak be a résztvevőknek. A következő napokon a résztvevők eljutnak néhány másik, hasonlóan érdekes helyre is: Grenoble-ban található az Institut Laue–Langevin (ILL), amely lényegében egy tekintélyes méretű, kutatási célra fejlesztett atomreaktor, ami a világ legnagyobb fluxusú neutronáramát produkálja, amit azután számtalan mérésben és kísérletben felhasználnak, többek között az anyagkutatás, szupravezetés, kolloid rendszerek és biológiai minták vizsgálatához. Szintén grenoble-i intézet az ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), ami egy 270 méter átmérőjű szinkrotron elektrongyorsító, ahol a nagy intenzitású szinkrotronsugárzást (röntgen-sugárzás) használják fel különböző kutatásokhoz, mérésekhez. A svájci Lausanne-ban meglátogatják az EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) egyetemet, amely többek közt igen jól felszerelt laboratóriumairól, illetve a Tokamak rendszerű kísérleti fúziós reaktoráról híres.

A Magyar Fizikushallgatók Egyesülete 1998 óta használja egyesületként működik. Célja és létezésének értelme, hogy a magyar fizikushallgatókat magas színvonalú tudományos és közösségi programokkal segítse, felemelje. Az ideális Mafihe egy nyitott, baráti közösség, amely viszont egyben motivál, példát mutat, így segítve elő tagjainak fejlődését nem csak szakmai, hanem emberi vonatkozásban is. Olyan közösség, amelynek részévé válni *életérzés*, tenni érte *életstílus*, az itt megszerzett tapasztalat pedig felívelő *életpályát* segít elő. Fejlődésünk



Az ICPS'11 szervező bizottsága.

egyik alappillére a magyar fizikushallgatók közti egyetemközi kapcsolatok erősítése, közös programokkal, intézménylátogatásokkal, kirándulásokkal. Ez persze az utazási költségek rohamos növekedése és a civil szféra pályázati forrásainak ezzel párhuzamos elapadása miatt egyre nehezebben és ritkábban valósulhat meg. Egy másik alappillért jelentene, ha a tanulmányaikban élen járó hallgatók nagyobb arányban tekintenék szívügyüknek a Mafiht: türelemmel, alázattal és toleranciával lehet utat nyitni azoknak a tehetségeknek, amelyeket nem képes kiaknázni sem a köz-, sem a felsőoktatás. A harmadik pillért pedig a régi mafiheiek jelentik. Tapasztalataik és elhivatottságuk révén tanácsaik és segítségük időről időre döntően hozzájárul egyesületünk fejlődéséhez.

Jubileumi programjaink keretében szeretnénk meg erősíteni, továbbadni a Mafihe immár 25 éve töretlen szellemiségét, hagyományait. A programsorozatra ingyenes kiadványt készítünk el, amely magas színvonalon hívatott megörökíteni egyesületünk eddigi történetét, egyúttal átfogó képet ad egy generációnyi magyar fizikus egyetemi éveiről, karrierjének kezdetéről. Idén először kívánunk egyesület-szinten részt venni a Kutatók Éjszakája programban szeptember 27-én, amellyel egyúttal szeretnénk hagyományt is teremteni. Látványos kísérleti bemutatók keretében szeretnénk népszerűsíteni a fizikát, lelkesíteni minden korosztálybeli fiatalt, hogy tanulmányaikban nagyobb hangsúlyt helyezzenek a természettudományokra.

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

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

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

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

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

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

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

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



Az ICPS'11 résztvevői az Eötvös Egyetem lágymányosi kampuszán.

Fontosnak tartjuk, hogy évfordulónkat szerény lehetőségeinkhez mértén méltón ünnepeljük meg, ezzel is elismerve elődeinknek azt a munkáját, aminek köszönhetően a Mafihe negyed évszázada folyamatosan segítheti a hallgatók fejlődését. Szeptember 28-án, szombaton kerül megrendezésre a jubileumi ünnepség a Csillebérci Ifjúsági és Szabadidő Központ Mediterrán Termében, amelyre egykori és jelenlegi Mafihe-tagokat, fizikushallgatókat és minden, az egyesület szellemiségéhez magát közel érző vendéget is szeretettel látunk. A rendezvény délután négykor rövid megnyitóval kezdődik, amelyet 20 perces előadások követnek majd. Az előadások keretében néhány felkért, kiemelkedő munkásságú régi tagunk

osztja meg élményeit, emlékeit és tanácsait. Szeptember 29-én, vasárnap bográcsozással egybekötött túrát tervezünk a Budai-hegységbe. (További részletek a memo25.mafihe.hu címen találhatóak.)

A jelenlegi fizikushallgatók és a Magyar Fizikus-hallgatók Egyesületének aktuális vezetése nevében szeretnénk megköszönni alapítóink, korábbi tisztviselőink, segítőink és támogatóink áldozatos munkáját, amivel lehetővé tették, hogy egyesületünk a mai napig épül, fejlődik, és amelyre egy nap talán majd mi is büszkeséggel tekintünk vissza, hogy részesei lehettünk.

Tóth Zsolt, Mafihe jubileumi ünnepség koordinátora
Lájer Márton, Mafihe-elnök

A Nap, ahogy még sohasem láttad.

Töltsd le!
Nézzed meg!
Mutasd meg másoknak!
Tanítsd meg diákjaidnak!

VAN ÚJ A FÖLD FELETT

Keress a fizikaiszemle.hu mellékletek menüpontjában!

Gyere el a múzeumba!

A kiállítás
korhatár nélkül,
fényképes
igazolvánnyal
ingyenesen
látogatható.

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

Érdeklődni lehet: 75/50-74-32

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

7031 Paks, Pf. 71. hrsz. 8803/15

telefon és fax: 06-75-505-000; 1/355-1332

weboldal: www.atomeromu.hu

Facebook profil:

www.facebook.com/paksiatomeromu



Atomenergetikai Múzeum



mvm paksi atomerőmű

ISSN 0015325-7



9 770015 325009 13009