

fizikai szemle



2007/4

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

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A nagy képen egy nyitott szárnyú
Morpho rhetenor lepke, alatta balra
egy *Albulina metallica*, míg jobbra
egy *Cyanophrys remus* lepke
felső és alsó oldala látható.
(Fotó: Kertész Krisztián, MTA MFA)

TARTALOM

A renormcsopotról, a kvantumtérelméleti végtelenekről és a kvantummechanika értelmezéséről – két beszélgetés Polónyi Jánossal, az MTA külső tagjával (<i>Hajdú János</i>)	109
<i>Márk Géza István, Bálint Zsolt, Kertész Krisztián, Vértesy Zsófia,</i> <i>Biró László Péter:</i> A biológiai eredetű fotonikus kristályok csodái	116
<i>Rajkovits Zsuzsanna:</i> Szerkezeti színek az élővilágban	121
<i>Horváth Dezső:</i> Kedvenc mértékegységeim	127
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Szász Ágota, Neda Zoltán:</i> Hálózati ping-pong, avagy a fény sebességének számítógépes mérése	132
Tíz éves a Csodák Palotája! (<i>Egyed László</i>)	135
KÖNYVESPOLC	139
HÍREK – ESEMÉNYEK	131, 140
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
Mitől színes az élővilág? (<i>Rajkovits Zsuzsanna</i>)	142
The renormalization group, infinities in quantum field theories and the interpretation of quantum mechanics – J. Hajdu's two talks with academician J. Polónyi <i>G.I. Márk, Zs. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, L.P. Biró:</i> Photonic crystals of biological origin	
<i>Zs. Rajkovits:</i> Structure colors in live Nature	
<i>D. Horváth:</i> My favorite units	
TEACHING PHYSICS	
<i>Á. Szász, Z. Neda:</i> Ping-pong reflecting – a computerized determination of light velocity 10 years of the Physical Miracle Palace (<i>L. Egyed</i>)	
BOOKS, EVENTS	
SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL	
Colors in live Nature: how do they come about? (<i>Zs. Rajkovits</i>)	
Die Renormalisationsgruppe, Unendlichkeiten in den Theorien der Quantumfelder und die Interpretation der Quantenmechanik – Zwei Diskussionen mit Akadememmitglied J. Polónyi (<i>J. Hajdu</i>)	
<i>G.I. Márk, Zs. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, L.P. Biró:</i> Fotonische Kristalle biologischen Ursprungs	
<i>Zs. Rajkovits:</i> Strukturfarben in der belebten Natur	
<i>D. Horváth:</i> Meine Lieblingseinheiten	
PHYSIKUNTERRICHT	
<i>Á. Szász, Z. Neda:</i> Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit mit Rechnern 10 Jahre des Palasts physikalischer Wunder (<i>L. Egyed</i>)	
BÜCHER, EREIGNISSE	
WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE	
Farben in der belebten Welt: wie kommen sie zustande (<i>Zs. Rajkovits</i>)	
О группе ренормализации, о бесконечностях в квантовой теории полей и об интерпретации квантовой механики (Разговор Я. Хайду с академиком Я. Полони)	
<i>Г.И. Марк, Ж. Балитт, К. Кертес, З. Вертеши, Л.П. Биро:</i> Чудесные кристаллы биологического происхождения в фотонике	
<i>Ж. Райкович:</i> Структурные цветы в живой природе	
<i>Д. Хорват:</i> Любимые мои единицы измерения	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>А. Сас, З. Недя:</i> Определение скорости света с помощью компьютеров Десять лет Палате физических чудец (<i>Л. Эдед</i>)	
КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ	
От чего цветная живая природа? (<i>Ж. Райкович</i>)	

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

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

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

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

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

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVII. évfolyam

4. szám

2007. április

A RENORMCSOPORTRÓL, A KVANTUMTÉRELMELETI VÉGTELENEKRŐL ÉS A KVANTUMMECHANIKA ÉRTELMEZÉSÉRŐL

Két beszélgetés Polónyi Jánossal, az MTA külső tagjával

– *Kolléga úr, Ön 1992 óta a strasbourgi egyetemen tanít elméleti fizikát. Kutatási területe a kvantumfizika, a kvantumtérelmélet. Alkotó munkásságát számos, többek között a nagybecsű Physical Review-ban megjelent tanulmánya dokumentálja. Milyen témákon dolgozik mostanában?*

– Az utóbbi években a renormcsoport módszer alkalmazásának határait igyekeztem tágítani. A renormcsoport alapgondolata az a paradoxnak tűnő állítás, hogy nincsenek valódi állandók a fizikában. Minden állandónak hívott mennyiség, általában bármely mérési eredmény, függ a mérést jellemző idő-, hosszúság- vagy tömegskálától. Vegyük példának egy folyadékba mártott test tömegét. A tömeg meghatározásának a problémája az, hogy a testtel együtt mozog a folyadék egy része, és nem világos, hogy hol kell meghúznunk a határvonalat a test és a környezete között. A tömeg egy lehetséges definíciója a mozgási energia alapján képzelhető el: a testet állandó sebességgel mozgatjuk, és valahogyan megmérjük az egész rendszer energiáját. A tömeg a kapott energia kétszeresének és a sebesség négyzetének hányadosaként adódik. Ez az eredmény természetesen nem egyértelmű, de ami most fontosabb, hogy függ az alkalmazott sebességtől. Folyadék helyett gondolhatunk levegőre, a probléma ugyanúgy megmarad, csupán a test tömegének numerikus értéke függ kevésbé a sebességtől. Ehhez hasonló gondolatmenettel bármely mérési eredményről belátható, hogy az általában elég komplikált módon függ a mérési protokolltól. A renormcsoport a fizikai törvény-

szerűségeket parametrizáló „állandók” megfigyelési skálától való függését térképezi fel.

Miért tartom ezt a módszert fontosnak? Hallani arról, hogy a fizika egyensúlyzavarba került, mert ugyan a technológiára alapuló korunkban egyre több alkalmazott fizikát igénylő problémával kerülünk szembe, az alapkérdések tisztázása lelassult a nagyenergiájú fizika struktúraváltozása miatt. Az egyre kisebb távolságokon lezajló fizikai folyamatok tanulmányozását eddig a részecskegyorsítók egyre nagyobb energiákra való hangolásával oldották meg. De ez a – közgazdaságtanból kölcsönzött hasonlattal élve – „extenzív” fejlődési folyamat a végéhez közeledik amiatt, hogy a jelenlegi technológia és erőforrásaink határára értünk. Az energia további jelentős növelése már sem technikailag, sem pedig tudománypolitikailag nem lehetséges. Ehelyett „intenzív” fejlődést kell követni, új kísérleti elvek kidolgozása segítségével kell tovább növelnünk a mérések felbontását. Példának a kozmikus sugárzás kis intenzitású, de gyorsítóinkkal elérhetetlenül nagy energiájú részecskéinek tanulmányozását lehetne említeni.

A renormcsoport módszere, amely a fizika törvényeinek a felbontóképességtől való függését követi nyomon, annyiban kapcsolódik a fizika általános problémájához, hogy egy alternatívát sugall. Ezt a módszert eddig olyan idő-, hosszúság- vagy tömegskála-tartományokban használtuk, amelyeket egy adott típusú kölcsönhatás jellemez. Azzal a céllal, hogy az adott kölcsönhatás erősségének változását kövessük a megfigyelés skálájának függvényében. De

bármely realiztikus modellnek számot kell adnia a fizikában megfigyelt különféle kölcsönhatásokról, és azoknak adott rendszerekben megjelenő eléggé komplikált, együttes megjelenési formájáról. Tehát egy realiztikus modellben nem elégedhetünk meg olyan módszerrel, amely csak egy fajta kölcsönhatást képes kezelni. Ezért a renormcsoportot olyan globális módszerre igyekeztem általánosítani, amellyel különböző típusú kölcsönhatások egymás utáni fellépését lehet tárgyalni, amikor a megfigyelés felbontását változtatjuk. A részleteket illetően utalok a Fazekas Gyakorló Gimnázium által kiadott *FA Fazekasban kezdődött...* kiadványra, annak a (<http://fizika.fazekas.hu/fazekasban.html>) *Renormalizációs csoport és metaelmélet* fejezetére.

Gondoljunk a Mindenség Elméletére, amely a Természet összes kölcsönhatását tartalmazza. Az elméletnek a renormcsoport által követhető paramétereit a fizikában és a mérnöki tudományokban előforduló összes fizikai és anyagtudományi állandók, mint például a részecskefizikából ismert elemi részecske paraméterek, atom- és szilárdtestfizikai konstansok, hidrodinamikai, makroszkopikus és asztrofizikai paraméterek együttese alkotja. A fénysebesség és a Planck-állandó egységnyinek választása után csak egy dimenzióval rendelkező paraméter marad, és ennek – mondjuk a hosszúságnak – függvényében a fizikai „állandók” egy görbét, az úgynevezett renormalizált trajektóriát, írnak le ebben a meglehetősen sokdimenziós térben. A rövid távolságú végpont egy általunk nem ismert elmülethez tartozik, melyről azt gondoljuk, hogy kevés független paramétere van. A renormalizált trajektória innen indulva olyan tartományokon halad át, amelyek egy-egy sajátos kölcsönhatáshoz tartoznak. Ez azért történik így, mert minden elemi kölcsönhatásnak van egy olyan skálatartománya, ahol a fizikai „állandók” skálafüggését jó közelítésben az adott kölcsönhatás szabja meg. Az összes többi kölcsönhatás elhanyagolhatóan tűnik egy ilyen skálatartományban a kölcsönhatások egymásba olvadásának követése szempontjából. A megfigyelési távolság növelésekor, további ismeretlen kölcsönhatások érintésével, elképzeléseink szerint 10^{-29} cm környékén a Nagy Egysítés Modell következik, amely az erős, gyenge és az elektromágneses kölcsönhatásokat egységesen írja le. A megfigyelési távolság további növelése az erős kölcsönhatás leválásához vezet, és ezután a renormalizált trajektória a gyenge-elektromágneses egyesített elmülethez érkezik 10^{-16} cm-nél, melytől az erős kölcsönhatás kvantumszindinamikának nevezett elmülethez vezet tovább az út. A részecske- és magfizika tartományát 10^{-12} cm-nél elhagyva az atomfizikához érkeünk, ahol már csak az elektromágneses kölcsönhatás aktív. Az angström távolság felé a szilárdtestfizika gazdag jelenségköréhez érünk, amelyben az elméletek gyors egymás utánban követik egymást. Itt a számos, egymással versengő kölcsönhatási mechanizmus jelenlétében nem lehet csupán egyetlen skálafüggést követni, mint ahogy ezt a magas hőmérsékletű szup-

ravezetés példáján is látjuk. Ezután jutunk el a fizika igazi „vízvázalasztójához”, a kvantum- és klasszikus fizikát elválasztó távolságskálahoz. Eközben más fontos jelenségek is előfordulhatnak. A környezet módosításával, mint például hő- és részecske-tartályok csatlakoztatásával, a trajektória további fejlődését mesterségesen is befolyásolhatjuk. Végezetül az Univerzum különböző tartományaiban egymástól különböző infravörös, nagytávolságú végpontokba fut be a renormalizált trajektória.

Az említett alternatíva a különböző tartományokban talált paraméterértékek közti összefüggések meghatározása, azaz egy adott távolságskálán megjelenő fizikai folyamat rövidebb távolságon végbemennő jelenségek alapján való, részletesebb „levezetése”. Ez nem egyszerű feladat. Például a nagyenergiás fizika célja a trajektória rövid távolságokhoz tartozó részének megismerése annak reményében, hogy ezután „a többi már csak” modellszámolás. Azonban az anyagtudományokban használt fizikai paraméterek szempontjából a nagyenergiájú fizika elemi paraméterei nem tűnnek fontosnak, annak ellenére, hogy például egy nehéz kvark tömegének kísérleti meghatározása kutatók százainak több éves erőfeszítését igényli.

A renormcsoport által sugallt alternatíva tehát az, hogy a Természet megismerése, megértése érdekében a felbontóképesség minden határon túl történő növelése helyett próbáljuk egymásból leszarmaztatni a már elért skálákon talált különböző törvényszerűségeket. Nevezetesen, próbáljuk megérteni, hogyan épül fel a proton átmérőjénél jóval kisebb távolságokon megismert kölcsönhatásokból a magfizika, az atomfizika, a szilárdtestfizika és végezetül a klasszikus, makroszkopikus fizika. Feltéve, hogy a megértés sorrendje a mikroszkopikus fizikától a makroszkopikus irányban halad. A kvantumánomáliák és hasonló, a renormcsoport módszerével tárgyalható jelenségek még ezt a sorrendet is megkérdőjelezzik.

Hogy végre a kérdésre is konkrét választ adjak: a renormcsoport módszer alkalmazásával a szilárdtestfizikában észlelt úgynevezett Anderson-lokalizációt próbáltam leírni. Bebizonyosodott, hogy a módszer a fázisátmenet mindkét oldalán jól működik, és ezzel lehetővé vált a rendezetlen rendszerek egységes tárgyalása. Jelenleg pedig az elektrodinamika kvantumklasszikus átmenetének leírására általánosítom a renormcsoport módszert.

– *A perturbációszámítás a kvantummechanika egy bevált módszere, termennyiségekre alkalmazva magasabb rendben általában végtelen kifejezésekhez vezet. Az esetek egy részében ezek a divergenciák ügyes matematikai fogásokkal kiküszöbölhetők ugyan, de, dacára a sikereknek, alkalmasint némi szorongást keltenek. Indokolt-e ezért kételkedni a térelmélet mai formájának általános érvényességében?*

– Ez valóban ijesztő probléma, emiatt Dirac, Landau és más mértékadó fizikusok tévesnek ítélték a kvantumtérelméletet. Azóta felismerték, hogy a kvantumtérelmélet a kvantummechanika alapelveinek kö-

vetkezetes alkalmazásával, nevezetesen a kinematikai szimmetriák ábrázolásainak megalkotásával egyértelműen levezethető. Ha a kvantummechanikát elfogadjuk, akkor nem vehetjük el a kvantumtérelméletet sem. Továbbá egyes térelméletek numerikus tanulmányozása azzal a tanulsággal zárult, hogy az említett divergenciák nem csupán a perturbációs számítás délibábjai, hanem valóban jellemzőek a kvantumtérelméletekre, ha az elemi részecskék egymástól tetszőlegesen kis távolságban is előfordulhatnak. A problémát úgy összegezzük, hogy a pontszerű, struktúra nélküli elemi részecskék kvantummechanikai leírása összeférhetetlen a téridő folytonos struktúrájával. Nem beszélhetünk pontszerű részecskékről anélkül, hogy egy minimális távolságot ne kellene feltételezni, amelynél jobban a részecskék nem közelíthetik meg egymást. Ezt a lépést hívják az elmélet regularizálásának.

A probléma gyökerei már a nemrelativisztikus kvantummechanikában is felismerhetőek. A pontszerű részecskék kvantum propagálása sehol sem differenciálható, fraktáltrajektóriák mentén történik. A cikk-cakkos trajektóriák divergenciákhoz vezetnek inhomogén mágneses térben, és megnehezítik a szokásos Schrödinger-egyenlet levezetését a relativisztikus kvantumtérelméletből. A kvantummechanika sehol sem differenciálható, azonban még folytonos trajektóriái a térelméletben sehol sem folytonos és divergáló ugrásokat tartalmazó térmennyiségeknek felelnek meg. Mindezek a divergenciák a Planck-állandóval arányosak, és így a kvantummechanika alapstruktúrájához tartoznak. Belátható, hogy formális kiküszöbölésük a kvantummechanika Heisenberg-féle felcserélési relációinak elvesztéséhez vezet.

A minimális távolság bevezetése nem jelent valódi problémát, hiszen nincs semmi, kísérletileg megalapozott okunk azt hinni, hogy a jelenleg ismert fizikai folyamatok tetszőlegesen kis távolságokon is ugyanúgy megtörténhetnek. A legjobb felbontású mérések is csupán körülbelül 10^{-16} cm-re érnek le és elméleti úton sohasem tudhatjuk meg, hogy mi várja a kíváncsi érdeklődőt ennél kisebb távolságokon. Még a renormalizálható modellekben is, ahol a minimális távolsággal zérushoz lehet tartani, találunk kvantum-anomáliákat, mint például az erős kölcsönhatás úgynevezett királis anomáliája, melyek jelenléte annak bizonyítéka, hogy az előbb említett divergenciastruktúra valóban jelen van a fizikai folyamatokban, és a belőle fakadó minimális távolság ugyan tetszőlegesen kicsi lehet, de véges. A matematikai végtelen és limesz fogalma a klasszikus fizika alapján sugallt egyszerűsített modell olyan rendszerekre, melyek az adott megfigyelés felbontásában nem mutatnak mikroszkopikus struktúrát. A kvantumfizika nem ilyen világról tanúskodik.

Itt talán érdemes elgondolkodni a matematikai számfogalom zavarba ejtő sikerességén. A természetes számokat az ókorban állatok, objektumok mennyiségének jellemzésére találták ki, de azok által-

nosítását, a valós és komplex számokat a mikroszkopikus fizikában is használjuk. Miért vagyunk biztosak abban, hogy a klasszikus fizikára alapozott számfogalom általánosításai helyesek maradnak a kvantumfizikában is? A geometriai pontokat jellemző számmennyiségek szorzásának nem-kommutatív általánosítása elegáns és a kvantummechanikában természetes lépésnek tűnik a kontinuumba ágyazott pontnak reálisabb fogalomra való lecserélésére, azonban még nem sikerült ezt a számstruktúrát két dimenzióról a világunk három dimenziójára általánosítani. Jobb megoldás hiányában egyelőre tehát megtartjuk a kiterjedés nélküli pontokat jellemző valós számokat a háromdimenziós tér jellemzésére, csak éppen a pontszerűnek feltételezett elemi részecskéket nem engedjük egy bizonyos minimális távolságnál közelebb egymáshoz. A megfigyelések felbontóképességének további, feltehetően nagymértékű növelése során természetesen vagy a kvantumfizika jelenlegi törvényei cáfolódnak majd meg, vagy pedig a tér valamilyen granulátumos, diszkrét struktúráját találjuk meg.

– *Ön hogy ítéli meg a húrelmélet jelentőségét ebben az összefüggésben?*

– A húrelmélet alap gondolatát a gravitáció problémaköre sugallta. A szokványos, pont részecskékre alapuló kvantumtérelmélet keretein belül a gravitáció kvantumváltozata nem renormalizálható, a minimális távolsággal nem tarthatunk nullához. A megoldás a húrelmélet szerint a részecskék pontszerű mivoltának hűrszerű általánosítása. Az eredmény egy rendkívül bizarr világ, mely bizonyos határesetben esetleg hasonlónak tűnik a miénkhez. Úgy érzem, hogy ebben az elméletben a matematikai komplexitás nem áll arányban a fizikai problémával. Nincs semmilyen kísérleti jelzés arra, hogy a gravitációs kölcsönhatás kvantum általánosítására szükségünk lenne, hogy a Természet a gravitációt nem csupán a klasszikus tartományban használja. Nincs semmilyen matematikai vagy fizikai indok arra, hogy a minimális távolsággal nullához tartunk a kvantumfizikában. A fizikai alapfogalmak húrelmélet által megkívánt alapvető általánosítását szerintem számos súlyos és pontosan körülhatárolt kísérleti tény ismerete után lehetne csak elfogadni. A húrelmélet a kvantumtérelmélet egy olyan regularizációja, melynek részleteit fizikailag interpretáljuk. A kvantumtérelmélet szokásos használata során a minimális távolság körül lezajló dinamikai folyamatokat azért nem azonosítjuk megfigyelhető jelenségekkel, mert a regularizáció szükségessége éppen az ismereteink hiányosságát tanúsítja.

– *A kvantumtérelmélet egyik legnagyobb sikere az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése, a W és a Z bozonok létezésének megjelölése, és a tömegük magyarázata a Higgs-mechanizmus alapján. Úgy tűnik azonban, hogy az erős kölcsönhatás bevonása, a Nagy Egyesítés komolyabb nehézségekbe ütközik a vártnál. Hogyan ítéli meg ezt a problémát?*

– Ez a probléma a húrelmélet által felvetett kétely ellenkezőjének tűnik. Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése az alacsony hőmérsékletű szupravezetés, a spontán szimmetriasértés mértékelméletekben megvalósított mechanizmusán alapul. A Nagy Egyesítés Modelljében feltételezzük, hogy az energiának tizenhét nagyságrenden keresztül való növelése közben nem találkozunk új kölcsönhatással, továbbá egy hasonló spontán szimmetriasértés jellemzi az elemi részecskék dinamikáját ezen a skálán is. Számomra ez az elképzelés az elektroyenge kölcsönhatás leírására használt matematikai formalizmus túlságosan „konzervatív” használatát és kiterjesztését jelenti. Az utóbbi száz év alatt a fizika fejlődésében a mérések felbontásának körülbelül tíz nagyságrendű növelése közben felfedezett új kölcsönhatások és részecskék több új fejezetet nyitottak. Miből gondoljuk, hogy ez a tendencia megváltozik, és a felbontás további tizenhét nagyságrenden keresztül való növelése közben a matematikai struktúra semmilyen lényeges módosítására nem lesz szükség?

– *Hogy áll napjainkban a gravitációs tér kvantálásának problémája?*

– Ez egy rendkívül izgalmas, de sajnálatosan csupán matematikai és nem fizikai probléma. A gravitáció szokványos kvantumtérelméleti formájában nem tűnik renormalizálhatónak, és a renormalizálható változat keresése teljesen új matematikához vezet. Már említettem a húrelméletet, mint egy matematikai lehetőséget, de ennél sokkal természetesebbnek tűnő változat a 80-as években megjelent hurokgravitáció. A név szörnyen technikai és semmi intuitív jelentéssel nem bír. A lényegét úgy lehetne összefoglalni, hogy „kutyaharapást szőrivel gyógyítsunk”. Konkrétabban, a gravitáció klasszikus Einstein-egyenlete megjósolja, hogy egy pontszerű tömeg körül az úgynevezett Schwarzschild-horizont alakul ki, amely meggátolja, hogy a részecske környezetének a horizonton belül eső részéből bármilyen információ kijusson. A hurokgravitáció a Schwarzschild-sugarat használja minimális távolságnak, ami azért természetes, mert végtelen időbe telik, hogy ennél jobban megközelítse egymást két tömegpont. Ez a vonzó elképzelés, sajnos – az ismereteink jelenlegi állása alapján – teljesen ellenőrizhetetlen, mert mintegy húsz nagyságrend választja el a kísérleti berendezéseinket és a keresett jelenségeket. Megint ahhoz a kérdéshez jutottunk vissza, hogy miért szükséges feltétlenül zérushoz tartani a minimális távolsággal?

Fontosabbnak tartom az ennél kevésbé ambiciózus, de több relevanciával bíró kérdéseket. Arra a problémára gondolok, hogy van-e a jelenleg elérhető felbontásban észlelhető effektusa a gravitáció kvantumformájának? E kérdés tisztázása érdekében elegendő egy kicsi, de véges minimális távolságot bevezetni a kvantumgravitáció elméletében. Az utóbbi években arra utaló jeleket találtunk, hogy a gravitonok, a gravitációs tér kvantumai bezáró kölcsönhatással állnak egymással kapcsolatban. Ez azt jelenti, hogy a hadronokat alkotó kvarkokhoz hasonlóan a gravito-

nok is csak több graviton együttes kötött állapotai-ként fordulnak elő a Természetben. Úgy gondoljuk, hogy a gravitációs kölcsönhatásnak csupán a nem-propagáló része figyelhető meg nagy távolságban. Ez a jelenség megmagyarázhatja a gravitonok megfigyelésére irányuló kísérleti próbálkozások több évtizede negatív eredményét.

II.

– *Az utóbbi években ismét megélnék az eszmecsere a kvantummechanika megalapozásáról. Mint-ba növekvő lenne azok tábora, akik a koppenhágai interpretációt nem tartják kielégítőnek. Ön hogy vélekedik erről a kérdésről?*

– Szerintem az erre a kérdésre adandó válasszal a fizikusok az egyetemes kultúrának tartoznak. De a koppenhágai interpretáción való túllépést annak kell megelőznie, hogy egyáltalán tisztában legyünk azzal, mi is ez az interpretáció.

Kezdjük ott, hogy a kvantummechanikát minden egyes eddigi megfigyelés igazolja, sőt, ez az egyetlen fizikai elmélet, amelynek alkalmazhatósági határait száz év intenzív munkával sem sikerült elérni. Ugyanakkor az alkalmazott matematikai formalizmus és fogalmi rendszer teljes ellentmondásban van a klasszikus fizikára alapuló világképpel. Ez utóbbit képviselte markánsan *Einstein*, és javasolt *Podolsky*-val és *Rosennel* együtt 1935-ban egy gondolatkísérletet, mely kihangsúlyozza az említett ellentétet. A kísérletet csupán 1982-ben sikerült megvalósítani, és az a kvantummechanikával teljes mértékben megegyező eredményhez vezetett, miszerint a kvantummechanikai állapotot leíró hullámfüggvény egy bizonyos, nagyon speciális változása a fénysebességnél gyorsabban terjed. A kísérlet további finomításával sem sikerült semmilyen késleltetést találni, a terjedési sebesség alsó határa jelenleg tízmilliószorosa a fénysebességnek. A helyzet abszurditását az is mutatja, hogy ugyanakkor a fénysebességet tíz számjegy pontossággal ismerjük a klasszikus fizikából. *Einstein–Podolsky–Rosen* gondolatmenete arra alapult, hogy nem vonatkozhat a fizikai valóságra az az elmélet, amely ilyen durván megsérti a speciális relativitáselméletet. De ha nem a valóságról van szó a kvantummechanikában, akkor miről szól a fizika? Szeretném megemlíteni, hogy a probléma függetlennek tűnik a kvantummechanikában uralkodó indeterminizmustól, és az elmélet fogalmi megalapozását kérdőjelezi meg.

A koppenhágai interpretáció, amely történelmileg *Bohr* nevéhez fűződik, több éves kollektív munka eredményeképpen kialakuló kompromisszum volt a mikroszkopikus fizikát jellemző bizarr eredményeket és gondolatmeneteket illetően. Szigorúan elválasztja a makroszkopikus és a mikroszkopikus világot, és nem enged semmilyen, a makroszkopikus fizikából származó előzetes elképzelést a fizikai valóságra alkalmazni. A kvantummechanikát egy szótárként

lehet elképzelni, amely a mikroszkopikus fizika jelenségeit próbálja úgy-ahogy lefordítani a makroszkopikus fizika nyelvére anélkül, hogy a mikroszkopikus világ megkülönböztető és lényegi kérdéseire rákérdezhetnénk. Nem mintha Dirac, Einstein, *Heisenberg*, *Kramers*, *Lorentz*, *Pauli*, *Planck*, *Schrödinger*; hogy csak pár nevet említsünk Bohron kívül a kvantummechanika kidolgozói közül, nem javasoltak volna konstruktívabb interpretációkat. Csak ezek sorban ellentmondásba kerültek kísérletekkel vagy éppen gondolatkísérletekkel. A koppenhágai interpretáció az 1927-es, Brüsszelben megtartott Solvay Konferencián alakult ki végleges formájában, melyet Dirac úgy fogalmazott meg tömören, hogy a kvantummechanikai hullámfüggvény csupán ismereteinket tükrözi a mikroszkopikus rendszert illetően, és az elmélet a létező objektumok mibenlétéről semmit sem tud mondani.

Az elmélet megalapozói számára a felhasznált fogalmak szokatlan és ellentmondásos jellege arra utalt, hogy ezek ideiglenes eredmények, amelyeket hamarosan jobban megértett, végleges alakban fogunk ismerni. Ez nemcsak hogy nem történt meg, hanem ez az ideiglenes jelleg is egyszerűen lekopott, miután a következő generációk a kvantummechanikával, mint kísérletileg bizonyított, zárt elmélettel találkoztak tanulmányaik során. Hozzászoktunk egy ellentmondáshoz mielőtt megértettük volna az okát.

Szerintem egy másik üzenet is elveszett. Bohr és kollégái a mentális folyamatok akkoriban használatos fogalmait építették be a kvantummechanika szerkezetébe, és az 1926–27-es években a kvantummechanika több analogonjára is rámutattak a biológia és a pszichológia területén.

Az azóta kísérletileg alátámasztott kvantummechanika egy világnézeti krízishez is el kellett volna, hogy vezessen. Mert a 19. századi pozitivista, materialista világnép teljes kudarca, hogy a fizika alapjait kutatván kénytelenek voltunk az anyaggal kapcsolatos felfogásunkat teljes egészében feladni anélkül, hogy új harmóniát találtunk volna. Amit 1926 óta materializmusnak tekintünk a fizikában, az még közösítő viszonyban sincs a fizikai világot determináló kauzalitásra épülő képpel. Sajnos a 20. század ideológiai, politikai, gazdasági és igazi, véres konfliktusai elterelték a figyelmet erről az előttünk megnyíló filozófiai szakadékról. Vagy feladjuk, hogy egy összetett rendszert alkotó elemekre bontva értsünk meg, vagy pedig egy új világnézetet kell kialakítanunk. Az ilyen irányú helykeresésben látom a mai fizika kultúrtörténeti szerepét.

Schwinger mérésalgebrai megközelítése a koppenhágai interpretáció továbbfejlesztésének olyan irányát sugallja, amelyet az utóbbi évek során egyre többen felvetnek, hogy a kvantummechanika tulajdonképpen a részleges információval való tudományos, azaz konzisztens és ellentmondásmentes bánásmód elmélete. Ennek az elképzelésnek szerintem a kvantum-teleportáció kísérleti megvalósítása, amelyben a fizikai állapot egy időre csupán információ formájában létezik,

további alapot szolgáltat. A kvantummechanika hullámfüggvénye a mikroszkopikus valóság és a makroszkopikus skálájú megfigyelések viszonyáról szól. A hullámfüggvény Einstein által felismert és elfogadhatatlanul gyorsnak ítélt változását úgy értelmezhetjük, hogy bármely újabb ismeret azonnal átírja információs-készletünket, azaz a hullámfüggvényt. Ez alapján a fizika célja nem annak a kérdésnek a tisztázása, hogy miből áll az anyag, a körülöttünk levő világ, hanem inkább e világ érzékeinktől távol eső és ezért számunkra intuitíve megfoghatatlan elemeinek a mi makroszkopikus skálánkon megjelenő szabályszerűségeinek feltérképezése. (Zárójelben meg szeretném említeni, hogy szerintem ezzel a következtetéssel már azóta adósak vagyunk, amióta tudjuk, hogy az azonos kvantumszámú elemi részecskék egymástól szigorúan megkülönböztethetetlenek.)

Ennek a képnek az indoklásául a valószínűség fogalmát említeném. A valószínűség a matematikában *Kolmogorov* nyomán bizonyos halmazokon jól meghatározott tulajdonságokkal bíró mértékként definiálható. Ez a definíció nem konstruktív, és semmiféle kapcsolatot nem garantál a valósággal. Ez a határozatlanság, amely a valószínűségi számítás az információ hiányának elméletévé teszi, a valószínűség objektív és szubjektív interpretációjához vezet. Az előbbi, sokszor ortodoxnak hívott interpretációban a valószínűség a nagy számok törvénye alapján az empirikusan meghatározott előfordulási gyakoriságnak felel meg, míg a utóbbiban, melyet főleg *Pólya*, *Cox* és *Jaynes* dolgozott ki a múlt század közepén, egy szubjektív, jobban nem azonosítható esély fogalmából származik. A kvantummechanika az egyetlen elmélet, amely a valószínűséget definíció szintjén konstruktív módon tartalmazza. Melyik interpretáció alkalmazandó a kvantummechanikai valószínűségekre? Hasonlíthat-e a valószínűség a valóság olyan objektív mérőszámához, mint például a tömeg vagy a töltés? Az objektív valóság egy feltétele a megfigyelhetőség, a mérhetőség. A nagy számok törvénye alapján definiált valószínűség kísérleti meghatározása végtelen sok megfigyelést, mérést igényel, ezért a kvantummechanikai valószínűséget a klasszikus statisztikus fizika valószínűségével ellentétben nem lehet objektív módon értelmezni.

Ezzel a problémával kapcsolatban érdemes visszaemlékezni egy, a kvantummechanika valószínűségi értelmezését megalapozó szokásos fordulatra, miszerint „végtelen sok, független, egymással azonos módon elkészített mikroszkopikus rendszeren” végezzünk kísérletet. A valószínűség fogalmának előbb említett sajátossága erősen megnyírbálja az ilyen rendszerek azonosságába vetett bizalmunkat. Továbbá, ha a mikroszkopikus rendszer állapota, akár csak megközelítően is, degenerált, akkor a környezettel való elhanyagolható erősségű kölcsönhatás is erősen összefonódott állapothoz vezet, ami pedig a függetlenséget kérdőjelezi meg.

Véleményem szerint azzal a tudománytörténeti jelenséggel állunk szemben, hogy a huszadik század

második felében nem volt olyan kutatócsoport, amely professzionális súlyát illetően hasonlíthatna az 1920-as években a kvantummechanika kidolgozásán együttműködő kutatókhoz, mert korunkban nincs olyan jól definiált természettudományi probléma, amely a kortársak legjavát együttes munkára bírná. Ezért a kvantumfizika gondosan, de ugyanakkor drasztikus módon redukált céljait és alkalmazási területét nem vállalta fel a későbbi generáció. Az általuk tanított kvantummechanika egy szelídített, az interpretációs problémát inkább a háttérbe szorító elméletté vált. Ezt a folyamatot a kvantummechanikára alapuló technológia fejlődésének viharos üteme még tovább is bátorította. Az ismeretek továbbadása törekvésének illusztrálására megemlítem a dekoherencia jelenségét, amely valószínűleg a kulcs a kvantum–klasszikus átmenet megértése szempontjából. Először *Neumann* gondolt erre a lehetőségre és megemlítette kollégájának, *Wheeler*nek. Csak ez utóbbi doktorandusza, *Zurek* dolgozta ki részletesen a dekoherencia jelenségét, mintegy negyven évvel annak felbukkanása után.

A kvantummechanika interpretációjának jobb megértésével egy sereg függetlennek látszó probléma kerülhet új megvilágításba. Elegendő lesz a gondolkodásunk egyes hírhedt kérdéseire utalni, mint például a memória, a szabad akarat, az egymással ellentétes érzelmek együttes fellépése, a szubjektum–objektum dualizmus ismeretelméleti problémái. Úgy vélem, hogy agyunk működésében meg kell különböztetni két szintet. A tudatos, verbális réteg alatt, amit egy digitális számítógéppel modellezhetünk, egy analóg számítógéphez hasonlító réteg létezését kell feltételeznünk, mely az érzelmenek nevezett, szubjektív valószínűséget megalapozó esélyre alapul. Kialakulását darwinisztikus alapon azzal lehetne alátámasztani, hogy a biztos információ luxus a túlélésért való harcban. Az esély fogalmának konzisztens használata rendkívül előnyös komplikált helyzetekben, mint például abban a döntésben, hogy mikor meneküljünk egy vélhetően közeledő vadállat elől a dzsungelben. Mihelyt a szubjektív esély megközelíti alsó vagy felső határát, a hozzá tartozó információ egyszerűsített, bináris módon processzálódik tovább. A fizika kvantum–klasszikus átmenete szerintem belső világunk tudattalan–tudatos határának felel meg. Figyelemreméltónak találom, hogy a kvantummechanika és a pszichoanalízis egy időben jelent meg kulturális horizontunkon, amikor a megfigyelések érzékenysége, finomsága egy bizonyos kritikus határt elért. A kvantummechanikában az Avogadro-szám által meghatározott információs kazalban kellett egy adott jelet megtalálni, a lélektan esetében pedig a tudatos gondolatok dzsungelében találtunk a tudattalan alig észrevehető nyomára.

Szerintem lehetőség nyílik arra, hogy áthidaljuk a természet- és a humán tudományok közti hagyományos ellentétet, felismerve, hogy az a pozitivistá, newtoni mechanikára alapuló, a kvantummechanika által már megdöntött világképen alapult. A naiv materialis-

ta világszemléletből tradicionálisan kilógó és „isteni szikra”-ként értelmezett életjelenségek esetleg beilleszthetők egy tudományos, kvantummechanikán nyugvó világképbe. Kvantumeffektusok valószínűleg nem fordulnak elő a sejtek közti kommunikáció során, olyan életjelenségekben, amelyekben sok sejt együttesen vesz részt. De ezeknek a makroszkopikus jelenségeknek a kezdete szükségképpen mikroszkopikus eredetű, és mint ilyen, a kvantummechanika hatáskörébe tartozik. Például, amikor hirtelen eszünkbe jut, hogy becsukjuk a szemünk, akkor ez a makroszkopikus mozgás egy mikroszkopikus folyamattal indul. Tehát az említett ellentétet esetleg úgy lehet feloldani, hogy elfogadjuk, hogy az idegsejtek membránnal védett belső, kisebb egységeiben lezajló döntési folyamatok kezdetén ugyanaz a világ jelenik meg, mint amit a kvantummechanikából valamennyire már ismerünk, csak épp a Boole-algebrára és klasszikus logikára alapuló intuíciónkkal fel nem fogható. Az a kép, miszerint az öntudat, vagy általában az életjelenség a sejtek belsejében fennáll, klasszikus módon kommunikálható stabil kvantumállapot nem nyírbálja meg a filozófia, pszichológia és biológia finom gondolatrendszerét, ugyanakkor tudományos vizsgálatok kiindulópontjaként szolgálhat.

– *Kolléga úr, Ön 1985-től 1993-ig a bostoni MIT-n tevékenykedett, mint kutató és tanár. Ha összehasonlíttja az amerikai, a francia és a magyar felsőoktatási és egyetemi rendszert, milyen előnyöket és hátrányokat lát az egyes rendszerekben és milyen következtetésekre jut?*

– Ez az egyik kedvenc kérdésem volt, hogy mi a jó, az átvenni való itt vagy ott? Míg meg nem győződtem arról, hogy egy közösségben megnyilvánuló előnyös és hátrányos vonások általában egymás szükségszerű megnyilvánulásai, pontosabban közös társadalmi-történelmi töről fakadnak. De a közös eredetek komplikált kérdését félretéve úgy gondolom, hogy a kontinentális és az angolszász oktatási rendszer fő különbsége az, hogy míg az előbbi az átlagos diákra optimalizál, az utóbbi az átlagtól való eltérést jobban tudja kezelni. Rövid távon az angolszász rendszer hatékonyabb, hiszen kevesebb ígéretes diákot veszít el. Azonban történelmi távlatban az általános műveltség gondozása döntő lehet annak a művelt középosztálynak a fenntartása szempontjából, amely eddig a kulturális fejlődés motorja volt Európában. Az egyetemi rendszer kevésbé változékony a kontinentális Európán belül. Azonban a francia felsőoktatásra jellemző a Napkirályok öröksége, az erősen központosított hatalom, amely egy, az állami bürokráciát újratermelő külön oktatási hálózatot is létrehozott. Nem kell sokat magyarázni, hogy ez miért nem segít a felsőoktatás általános szintjét és hatékonyságát illetően. A tradicionális rendszer viszont napjainkban, sajnálatos módon, szinte előnyösen hat a kulturális értékek fenntartása szempontjából. Ennek megfelelően a francia felsőoktatás kevésbé van kitéve a gazdaság törvényszerűségeinek. Kivételes szerencsének érzem, hogy gimnazistaként és

egyetemi hallgatóként a hatvanas-hetvenes évek Magyarországon tanulhattam. Matematikában és elméleti fizikában világszínvonalon álló oktatásban volt részem, amely differenciáltan kezelte a diákokat, és gazdagon jutalmazta tudással az érdeklődőt. Ez a hagyomány, ha viharverten is, de még mindig fellelhető. Talán a Kelet-Európára jellemző határmezsgye-effektusról van itt szó, hogy a kulturális áramlatok kereszteződésében pezsgőbb az élet.

– *A politikusok között eléggé elterjedt nézet szerint az egyetemek feladata a képzés, míg a kutatás a kutatóintézetek dolga, amelyek irányítása bazánkban az Akadémia hatáskörébe tartozik. Ön hogyan ítéli meg a kutatás és a képzés szétválasztására irányuló törekvéseket?*

– Először is válasszuk le a kérdésről a financiális hátteret, mely egyes döntések mögött áll. Ezután a probléma már egyszerűbb: természetes módon elválaszthatatlan a kettő. Persze vannak különbségek oktatás és kutatás között. Közismert jelenség, hogy az oktatástól elzárt kutatóintézet húsz-harminc év alatt menthetetlenül elöregedik. Ha valaki aktív élete során a világ zajától mesterségesen elválasztva „kutat”, az általában nem tudja szellemi horizontját szélesen tartani, és a kollégák következő generációja kezdettől fogva fokozottabban van kitéve az elszigetelődés veszélyének. Tehát az oktatásnak fokozatosan növekvő szerepet kellene játszania egy kutató élete során. Így sikeresebben megőrizhető a szellemi frissesség, és a társadalom is többet kap vissza értelmiségétől. Persze vigyázni kell, hogy a korosodást elkerülhetetlenül kísérő konzervativizmus lehetőség szerint ne hasson negatívan az oktatásra. A pedagógus munkája erősen antidemokratikus, arisztokratikus, és ezek a jegyek a konzervativizmus túlhajtásához vezethetnek. Ugyanakkor a konzervativizmus alapvető egy kultúra továbbadása során.

A politika horizontján túlmutató kérdés is rejtezik itt. Nevezetesen, hogyan kezeljük az oktatás és kutatás antidemokratikus vonásait? Hogyan dönthető el valakiről, hogy jó oktató vagy kutató? Szerintem ez a kérdés triviális egy szűk közösségen belül, ahol az emberek nyomon követik és értik egymás munkáját, és ugyanakkor eldönthetetlen társadalmi szinten. A demokrácia is hasonló. Jól működik kisebb közösségekben, ahol az emberek, ha nem is ismerik jól egymást, de jelentenek valamit egymásnak, és működésképtelen a görög városállamok méretein túl. Engedtessék meg egy további analógia is, hogy a fizika törvényszerűségei a megfigyelési skálától függenek. A renormcsoport minden olyan rendszerre alkalmazható stratégia, melyben alrendszereket lehet elkülöníteni.

– *A közelmúltban alkalmam volt szétnézni egy bázeli egyetemi könyvesboltban. A fizikai részleg polcain vagy kétszáz német és angol nyelvű tankönyvet és monográfiát találtam. Ezzel összehasonlítva a hazai kínálat lesújtóan sovány; messze elmarad az 1970–80 évek színvonalától. Öntől, mint a Sugárzás és Részecskék című, Patkós András akadé-*

mikussal közösen írt tankönyv egyik szerzőjétől kérem, mi a teendő a nyomasztó hiányállapot orvoslására?

– Vegyük tudomásul mint realitást azt a politikai-gazdasági környezetet, melynek módosítása messze túlmutat e beszélgetés keretein. Ami ezután marad mint lehetőség, az szerintem annak a közhelynek a tudatosítása, hogy világunk felgyorsult, az 1950-es évektől napjainkig terjedő időszakra koncentráldott a földtörténet során élt népesség fele. Arra hívnám fel a figyelmet, hogy ez az örült tempó rettentően megnöveli társadalmi felelősségünket, hiszen mire felfigyelünk egy hátrányos vagy veszélyes fejleményre, már késő is lehet a mi szintünkön való reagálásra. Mi egyetemi hallgatóként Magyarországon olyan tudományos világban nőttünk fel, amely stabil alapokon és jó hagyományokon nyugodott a fizikát illetően. Nem hiányzott a jövőbe vetett hit sem, elég csupán a Landau–Lifsitz sorozat magyar nyelvű kiadására gondolni. Fel kell fognunk, hogy ez már a múlté. Rajtunk áll, hogy a következő generáció mit kap Kultúrából, Tudományból, Fizikából, mert nekünk kell újratemetni a szükséges intellektuális és technikai környezetet, amely egyre gyorsabban avul el és kényszerül megújításra. Sajnálatos módon nem számíthatunk a fiatal korunkban meglevő, örökké jelenvalónak hitt alapokra. Hassunk oda, hogy kollégáink felismerjék a vállukon láthatatlanul is nyugvó felelősséget, és érezzék fontosnak, hogy hozzájáruljanak egy stimulálóbb környezet kialakításához. Nem a politikusoktól kell várni a megoldást, ők nem arra hivatottak. Túl kell őket élni, és akár ellenükben is fenn kell tartani egy bizonyos szintet a professzionális és személyes érdeünkben. Magyarország viharos utolsó évtizede nem kedvezett a spontán kezdeményezőképessegre alapuló mozgalmaknak, melyek Nyugat-Európában, de főleg Észak-Amerikában az ipari társadalomra adott válaszként fejlődtek ki.

– *Ön rendszeresen, általában évente többször is bazalátogat. Milyen témakörökben tart fenn kapcsolatot a hazai kutatással és oktatással?*

– Sajnos nem tudok elegendően hosszú időt egyhuzamban itthon tölteni ahhoz, hogy tanítsak, ahogy azt régebben nagyon szerettem, mert az itthoni diákok érdeklődése és színvonala párját ritkítja. A kutatást illetően könnyebb a helyzet. Hosszú ideje együtt dolgozom kvantumtérelméleti problémákon Sailer Kornéllal és Nagy Sándorral, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizika Tanszékének dolgozóival. A kvantumgravitáció témájában pedig Regős Enikővel, az ELTE Fizikai Intézetének munkatársával van munkakapcsolatom. Persze nagy örömet okoznak a kimerítő és részletes beszélgetések az ELTE és a BME Fizika Intézeteinek, valamint a KFKI RMKI Elméleti Fizikai Főosztályának dolgozóival is. A hagyományos magyar elméleti fizika iskola hatásának tartom azt, hogy sokszor gyorsabban és egyszerűbben értjük meg egymást egy itthoni, mint hasonló esetben külföldi kollégával.

– *Köszönöm a beszélgetést.*

Hajdú János

A BIOLÓGIAI EREDETŰ FOTONIKUS KRISTÁLYOK CSODÁI

Márk Géza István,¹ Bálint Zsolt,² Kertész Krisztián,¹ Vértesy Zofia,¹ Biró László Péter¹

¹ MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

² Magyar Természettudományi Múzeum

A lepkék szárnyain ámulatba ejtő színeket és mintázatokat láthatunk. Számos lepke annál ravaszabb trükköket is csinál a fényvel, minthogy egyszerűen „megszínezi”: a látható szín árnyalata és/vagy intenzitása – sőt, akár a visszavert fény polarizációja is – függhet a megvilágítás, illetve a megfigyelés irányától. Ezek a „fényjátékok” evolúciós előnyt biztosítanak a lepkéknek, ezért idestova 500 millió éve tökéletesíti őket a Természet. Három fő biológiai célra használják fel a pillangók szárnyszínüket: optikai jeladásra, rejtőzködésre és a hőmérsékletük szabályozására. A lepkeszárnyak színe kétféle eredetű lehet: egyrészt pigment által okozott szín, másrészt úgynevezett szerkezeti szín – ez utóbbi színeket a szárnyak mikroszerkezetén létrejövő fényinterferencia hozza létre.

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Nanotechnológia Főosztályán nagyfelbontású mikroszkópiai módszerekkel (pásztázó és transzmissziós elektronmikroszkópia), továbbá optikai spektroszkópiával tanulmányozzuk a szárnypikkelyek mikroszerkezetét és optikai tulajdonságait. A munkát az EU FP6 „BioPhot” programjának támogatásával végezzük, nemzetközi együttműködésben. Ebben a cikkben néhány szép példát mutatunk be a természet e gazdag tárházából. Megmutatjuk, hogy az optikai spektrum főbb jellegzetességei általában egyszerű, intuitív fenomenologikus modellek segítségével is megérthetőek. A természettől „elcseszett” trükkök lehetővé teszik hatékony és környezetbarát biomimetikus fotonikus eszközök és anyagok létrehozását, ilyenek lehetnek többek között színanyagok, kijelzők, antireflexió rétegek.

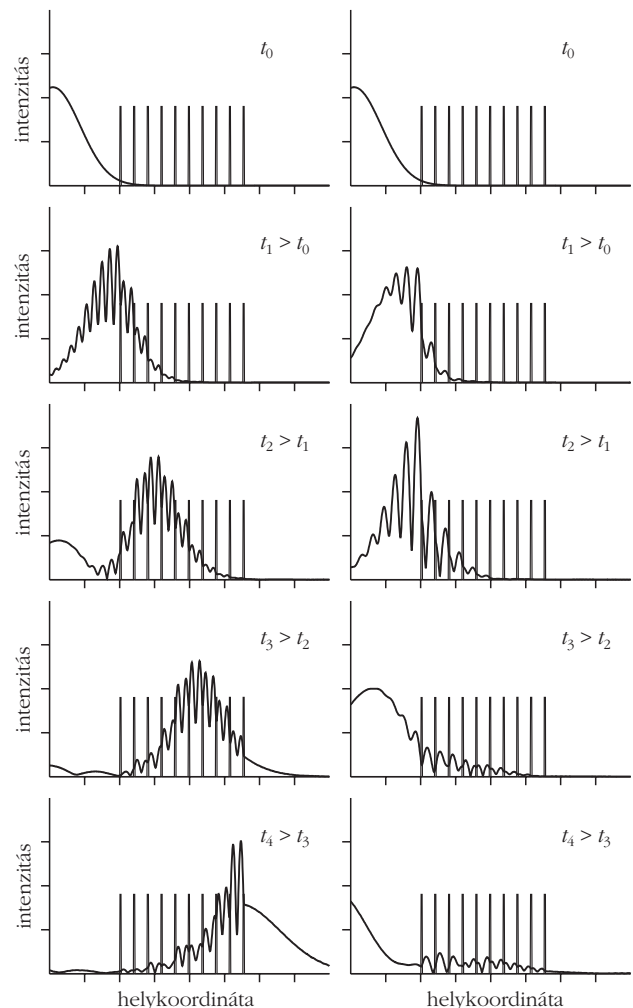
A fotonikus kristályok

Kristálynak az olyan fizikai rendszert nevezzük, amelynek jellemző tulajdonságai térben periodikusan változnak (azaz a tökéletes kristály térbeli eltolással önmagával fedésbe hozható). A *hullám* fogalom pedig valamilyen fizikai tulajdonság térben és időben periodikus változását jelenti. Ha valamilyen kristály-hullám kölcsönhatásnál a hullám hullámhossza a kristálybeli periódushossz nagyságrendjébe esik, akkor a kristály lényegesen befolyásolja a hullám szóródását: a szórás erőteljesen irány- és hullámhosszfüggő lesz. Bizonyos hullámhosszú sugárzás szabadon áthatol a kristályon, de lesznek olyan hullámhossztartományok is – ezeket a tartományokat nevezük *tiltott sáv*nak – amelyekbe eső hullámok nem haladnak át a kristályon, hanem visszaverődnek. Ezt a jelenséget mutatjuk be az 1. ábrán, egydimenziós modell segítségével.

A fenti általános kijelentések függetlenek a méretskálától:

- Atomokból, molekulákból álló kristályok esetén a rácspériodicitás a 0,1–10 nm nagyságrendbe esik. Ha ilyen hullámhosszú röntgen- (vagy neutron-) hullámot bocsátunk a kristályra, fellép a röntgen- (neutron-) diffrakció jelensége: a kristály csak bizonyos, jól meghatározott irányokba szórja a hullámokat. Ezek a térbeli irányok a kristály, illetve a sugár tulajdonságaitól függenek – ezen alapul a röntgen-, illetve neutrodiffrakció jelensége. A röntgendiffrakciót már több mint 100 éve alkalmazzák az anyagszerkezet vizsgálatára. A kristályokat felépítő atomok elektronjai maguk is szóródnak a kristályrácsra, ez alakítja ki az adott anyag elektron

1. ábra. Hullámcsomag szóródása egydimenziós, 10 periódusból álló kristályon. A bal oldali ábrákon esetén a hullámcsomag energiája a megengedett sávba (a hullámcsomag áthalad a kristályon), a jobb oldali ábrákon esetén a tiltott sávba esik (a hullámcsomag visszaverődik). A vízszintes tengelyen az x pozíció, a függőleges tengelyen a hullám intenzitása látható, a t idő főnről lefelé nő.



sávszerkezetét. A vezetők és félvezetők sávszerkezetének célirányos kihasználása tette lehetővé az elmúlt 50 évben az elektronika és a számítástechnika látványos fejlődését.

- A hanghullámok hullámhossza 0,1–1 m körüli. Ilyen skálán periodikus szerkezeteket régóta alkalmaznak az építészetben hangszigetelésre és visszhangmentesítésre. A biológiai kutatások szerint a halrajok is gyakran „kristályos” formába szerveződnek és ez meghatározza az akusztikus hullámok szóródását a halrajon – ez minden bizonynyal növeli a halak túlélési esélyét.

- Ha a kristály periodicitása a 100 nm – 1 μm nagyságrendbe esik, ez a látható fény tartományában (továbbá a közeli ultraibolya- és infravörös-tartományban) okoz diffrakciós jelenségeket. A fénydiffrakciót okozó kristályok – az úgynevezett fotonikus kristályok – olyan fizikai rendszerek, amelyekben térben periodikusan változik a törésmutató. Húsz évvel ezelőtt *Eli Yablonovitch* [1] állított elő elsőként olyan szerkezetet, amelynek tiltott sávja volt az elektromágneses hullámok bizonyos hullámhossztartományában. 6 mm átmérőjű furatok háromdimenziós, periodikus rendszerét fúrta egy teflontömbbe, és mérésekkel igazolta az elméleti számításokat, miszerint ennek a rendszernek a 13–16 GHz frekvenciatartományban (mikrohullám) tiltott sávja van. A későbbiekben litográfias módszerek segítségével a látható fény tartományában működő fotonikus kristályokat is létre tudtak hozni. A mikroelektronikai iparban a csipek előállítására alkalmazott litográfias eljárások nagy pontossággal – már 10 nm pontossággal –, gyorsan és olcsón képesek létrehozni a több millió alkatrészből álló integrált áramköröket [2], de csak két-dimenziós (egy síkban elhelyezkedő) szerkezetek előállítására alkalmasak. Háromdimenziós fotonikus kristályokat jelenleg csak laboratóriumban, nehézkes eljárásokkal lehet készíteni.

A természet több százmillió éve hoz létre szubmikronos, illetve nanoméretű skálán rendezett háromdimenziós szerkezeteket – minden élőlény ilyen rendszer. Fotonikus kristályszerkezetek is létrejöttek az evolúció során, ezek adják a lepkeszárnyak strukturális színeit.

A lepkeszárnyak strukturális színei

Az élőlények színei [3] kétféle fő módon keletkeznek. A pigmentszíneket festékanyagok (pigmentek) hozzák létre, ezek olyan anyagok, amelyeknek a fényelnyelése, illetve visszaverése hullámhosszfüggő – kémiai, elektronszerkezeti okból. A szerkezeti (strukturális) színeket [4] olyan biológiai szerkezetek hozzák



2. ábra. Az iridescencia jelensége *Morpho* lepkén. Ahogyan változtatjuk a megvilágítás irányát, a szárny más-más részein látjuk a fémes kék színt (az ábrán világos szürke), a szárny többi része sötétbarna (az ábrán sötétszürke). A szárny és a lepketű árnyékának iránya mutatja a megvilágítás irányát.



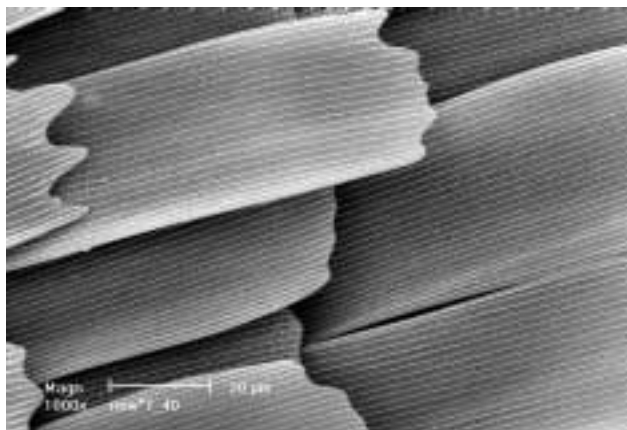
3. ábra. A közeg okozta színváltozás jelensége. Ha alkoholt cseppentünk a *Morpho* lepke szárnyára, az eredetileg kék szín (az ábrán világos szürke) zöldre (az ábrán sötétszürke) változik. (Az alkohol elpárolgása után majd visszaáll az eredeti szín.)

létre, amelyeknél a törésmutató szubmikronos skálán változik. Szerkezeti színeket növényeken és állatokon egyaránt megfigyelhetünk, de a szerkezeti színek legszebb és leggazdagabb tárházát az ízeltlábúak, elsősorban a bogarak és a lepkék adják.

Ha ránézünk egy lepkeszárnyra, hogyan állapíthatjuk meg, hogy pigmentszínt, vagy szerkezeti színt látunk? Két fontos alapjelenség segít ezt eldönteni: az iridescencia és a közegtől függő színváltozás jelensége – ezekre példákat a 2. és 3. ábrán mutatunk be.

Az iridescencia azt jelenti, hogy a szóban forgó test színének árnyalata vagy intenzitása erősen függ a megvilágítás, illetve a megfigyelés irányától – a felület gyakran fémes hatást kelt. A régebbi korok természetbúvárai valóban úgy vélték, hogy a lepkeszárny fémes színét fémréteg jelenléte okozza, és csak az 1920-as években jöttek rá arra – még fénymikroszkópos megfigyelések segítségével –, hogy ezt a jelenséget különleges interferencia hozza létre. Természetesen már egy egyszerű vékonyréteg – például olajfilm a víz tetején – színe is függ a megvilágítás és megfigyelés irányától, de azt a különleges jelenséget, hogy a szín árnyalata nem, de intenzitása függ az iránytól, csak háromdimenziós fotonikus kristályszerkezettel lehet létrehozni. A 2. ábrán egy *Morpho* lepkén mutatjuk be az iridescencia jelenségét. Miközben a pillangó repül, folyamatosan változik a szárny síkjának iránya a napsugárzás és a megfigyelő irányához képest, ezért a repülő *Morpho* lepke messziről egy villogó kék pontként látható – ahhoz hasonlóan, mint ahogy a rögzített helyen álló megfigyelő villogást érzékel, mikor a rendőrautó tetején forog a kék lámpa tükre.

A közegtől függő színváltozás jelenségét a 3. ábrán mutatjuk be. A lepkeszárny pikkelye egy kitinből felépülő háromdimenziós szerkezet, amelyet levegő tölt ki. A két anyag, a kitin és a levegő törésmutatójának eltérése (1,56 és 1) hozza létre a fotonikus kristályszerkezetet. Ha azonban a kitinszerkezetet kitöltő levegőt valamilyen más törésmutatójú anyaggal – a 3. ábrán alkohollal – helyettesítjük, akkor megváltozik



4. ábra. Az *Albulina metallica* lepke szárnyának pikkelyszerkezete SEM-képen. Jól megfigyelhetőek a hosszirányú gerincek a pikkelyeken.

a szárny színe. Ez a változás reverzibilis: ha a kitöltő anyag eltávozik a szerkezetből, ismét visszatér az eredeti szín.

Ha egyre növekvő nagyítással tanulmányozzuk a lepkeszárnyat, fokozatosan felfedezzük bonyolult szerkezetét. Az még fénymikroszkóppal is jól látható, hogy a szárnyembránt apró pikkelyek borítják, de a pikkelyek mikroszerkezete már csak elektronmikroszkóppal tanulmányozható. Intézetünkben kétféle elektronmikroszkópiát alkalmazunk: a pásztázó elektronmikroszkópiát (SEM) és a transzmissziós elektronmikroszkópiát (TEM): a SEM segítségével a minta felülete, a TEM segítségével a keresztmetszete vizsgálható. A 4. ábrán *Albulina metallica* lepke szárnypikkelyeit láthatjuk, SEM-képen. Megfigyelhetjük, hogy a pikkelyek szélessége körülbelül $50\ \mu\text{m}$, a hosszúsága pedig $100\text{--}150\ \mu\text{m}$. A pikkelyeken szabályos, hosszirányú gerinceket látunk, a gerincek között pedig valamilyen még kisebb skálájú szerkezet sejlik fel, de ez a szerkezet még nem ismerhető fel ebben a nagyításban. Növeljük hát tovább a nagyítást! Az 5., 6. és 7. ábrák SEM-képein már jól látható, hogy a gerinceket keresztbordák kötik össze. A gerincek és a keresztbordák ablakokat alkotnak, az ablakokon keresztül „belelátunk” a pikkely belsejébe, és ott egy szabálytalan lyukrendszer tűnik fel. Az 5., 6. és 7. ábrák keresztmetszeti TEM-képei megmutatják, hogy mikron nagyságrendbe eső vastagságú háromdimenziós szerkezetről van szó – megtaláltuk tehát a háromdimenziós fotonikus kristályt a lepkeszárnyon! Ezt a háromdimenziós, a pikkelyeket kitöltő szivacsos szerkezetet angolul gyakran *pepper-pot* (borsszóró) szerkezetnek nevezik, mert a borsszóró fedelén ehhez hasonlóan kinéző lyukrendszer van. Egy gyors pillantás az ábrák skálájára meggyőz minket, hogy a szerkezet periódushossza a néhány $100\ \text{nm}$ tartományba, tehát a látható fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik!

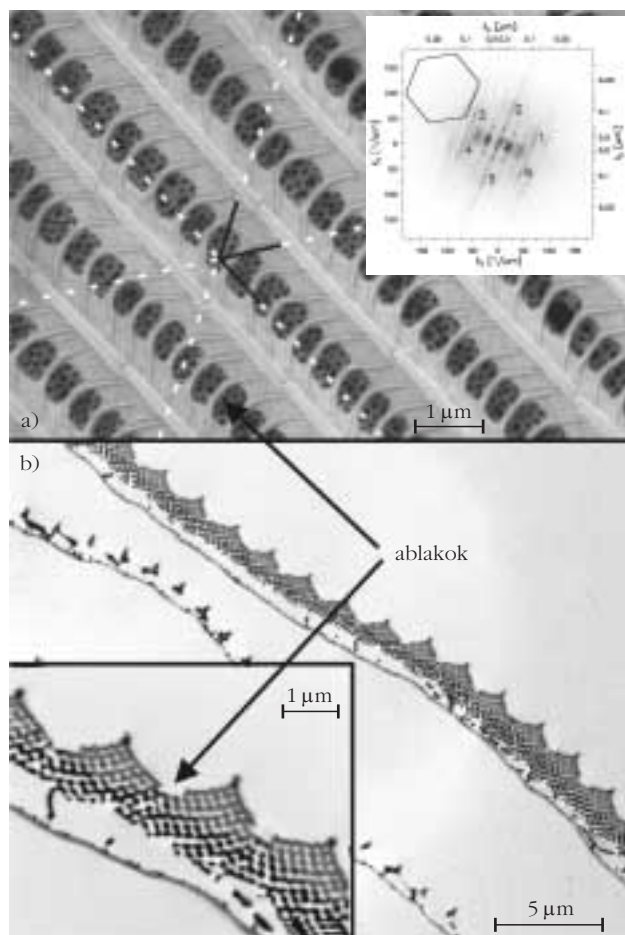
Mint korábban említettük, a szárnypikkely kitinből áll. A kitin egy összetett cukor (poliszacharid), amely az ízeltlábúak külső vázának (exoskeleton) legfontosabb építőanyaga. A kitin önmagában szintelen és a törésmutatója $n = 1,56$. A látható szín kialakulásához

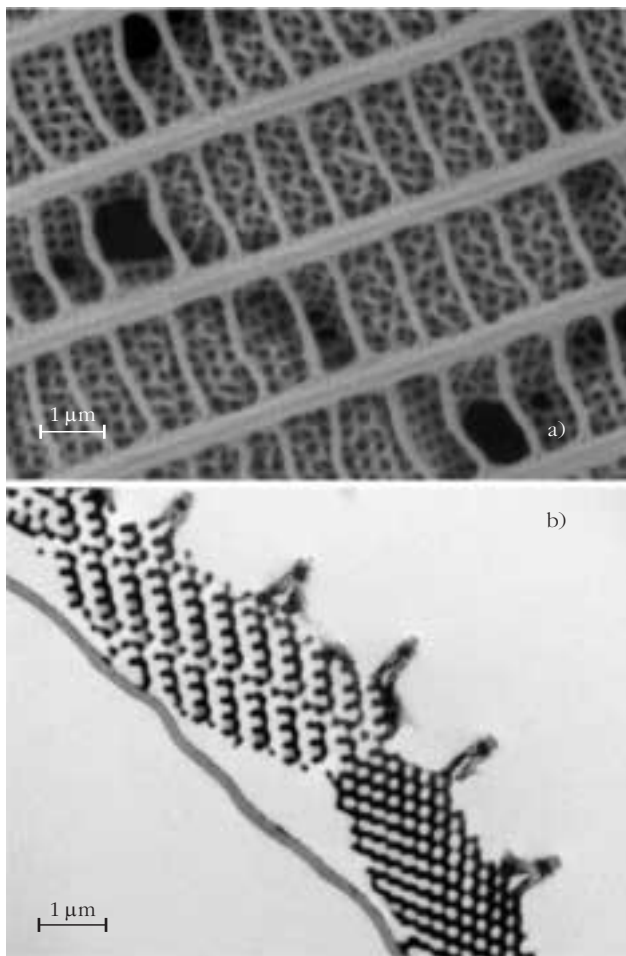
azonban általában pigment jelenlétére is szükség van a pikkelyben, a sötétbarna pigment (melanin) vagy a pikkely „alján” (a pikkelynek a szárny membrán felőli oldalán), vagy – granulák formájában – a pikkely térfogatában elosztatva helyezkedik el. A színt a fotonikus kristályszerkezet és a melanin összjátéka alakítja ki: a beeső fehér fénynek a fotonikus kristály tiltott sávjába eső komponenseit a fotonikus kristály visszaveri (ld. 1. ábra), a többit átereszt. Az áteresztett fény azután a pigmentben elnyelődik. Ez a pontosabb magyarázata a 2. ábrán látható iridescenciajelenségnek: azoknak a megvilágítási irányoknak az esetén, amelyeknél a fotonikus kristály visszaveri a kék fényt, ezt a kék fényt látjuk, a többi megvilágítási irány esetén a fotonikus kristály átlátszó, ezért csak a melanin sötétbarna színét látjuk.

A lepkeszárnyak csodás trükkjei

Ebben a részben két lepkét vizsgálunk meg kicsit részletesebben. A címlapon bemutatjuk a két lepke – *Cyanophrys remus* és *Albulina metallica* – szárnyá-

5. ábra. A *Cyanophrys remus* lepke felső szárnyoldalának egy pikkelyén látható mikroszerkezet. a) SEM-kép – felülnézet, b) TEM-kép – keresztmetszet. Az a) ábra jobb felső sarkában a SEM-kép kétdimenziós Fourier-teljesítményspektruma látható. A b) ábra bal alsó sarkában kinagyítva látható a pikkelyt kitöltő szabályos szivacsos szerkezet.



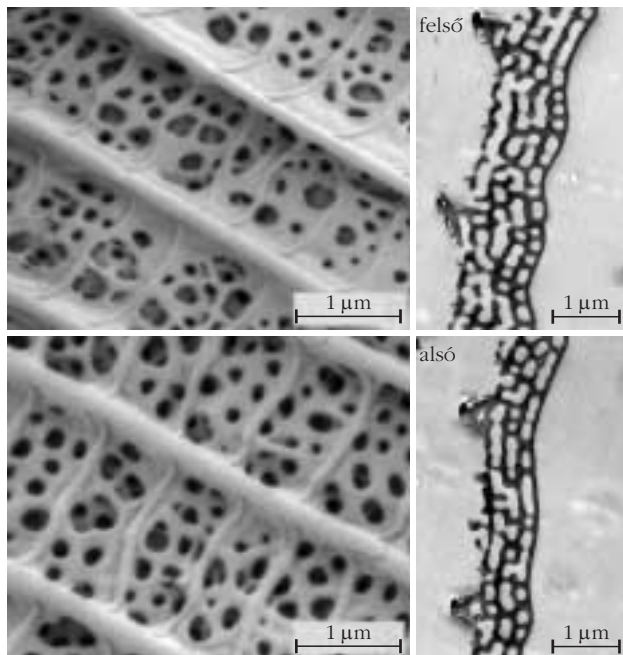


6. ábra. A *Cyanophrys remus* lepke alsó szárnyoldala egy pikkelyének mikroszerkezete. a) SEM-kép, b) TEM-kép.

nak felső és alsó oldalát. A pillangók pihenés közben általában összezárják a két szárnyukat, így ilyenkor a szárny alsó oldala válik láthatóvá. Ezért a szárny alsó oldala általában a rejtőzködést szolgálja: a pihenő lepke színével és mintázatával belesimul élőhelye környezetébe. Ez magyarázza a *Cyanophrys remus* alsó szárnyoldalának matt zöld színét – így válik észrevehetetlenné a zöld növényi háttéren. Az *Albulina metallica* viszont harmatos környezetben él – ezért ezüstös zöld a szárnyának alsó oldala. A szárny felső oldala többnyire jeladás céljára szolgál: mikor a pillangó kitarja a szárnyát, láthatóvá válnak a felső oldal fényes színei.

Fotonikus monokristály és polikristály – a *Cyanophrys remus* szárnyának két oldala

Az 5. ábrán a lepke szárnyának felső oldaláról vett pikkely felülnézeti (SEM) és keresztmetszeti (TEM) képét látjuk. A SEM-képen a gerincek és keresztbordák közötti ablakokban jól látható a pikkely testét kitöltő lyukacsos szerkezet legfelső rétege. Ahogyan a TEM-képen – és különösen a kinagyított kis képen – megfigyelhetjük, a pikkelyt háromdimenziós szivacsszerű szerkezet tölti ki, mégpedig teljes egészében, tehát nemcsak az ablakokon keresztül látható részben, hanem a gerincek alatt is. Habár az



7. ábra. Az *Albulina metallica* lepke felső- és alsó szárnyoldala egy-egy pikkelyének mikroszerkezete. Bal oldalon SEM-képek, jobb oldalon TEM-képek.

ablakok közötti „fal”-réteg a pásztázó elektronmikroszkóp számára nem átlátható, a fény könnyedén áthatol ezen a körülbelül 100 nm vastag rétegen, úgyhogy a fényszórás kialakításában a teljes, a pikkelyt kitöltő háromdimenziós fotonikus kristályszerkezet részt vesz.

Közelebbről megnézve az 5.a ábrát láthatjuk, hogy a lyukak nem teljesen véletlenszerű módon helyezkednek el, de nem is teljesen rendezetten. Olyan a kép, mintha véletlenszerűen perturbált háromszögrácsot látnánk. Kiválasztottunk egy lyukat egy ablak közepe táján, és a legközelebbi szomszédok irányába egyeneseket rajzoltunk – ezek a fekete szakaszok az 5.a ábrán. Ha a fekete szakaszokat meghosszabbítjuk úgy, hogy a többi ablakon is keresztülhaladjanak – ezek a szaggatott fehér egyenesek – akkor észrevehetjük, hogy a többi ablakban is jó közelítéssel metszik ezek az egyenesek a lyukakat. Ez arra enged következtetni, hogy hosszútávú – azaz több ablakra kiterjedő – rend van jelen a szivacsos szerkezetben. Feltételezésünk ellenőrzésére kiszámítottuk a SEM-kép kétdimenziós Fourier-teljesítményspektrumát, ez látható az 5.a ábrán a jobb felső sarokban. A Fourier-képen a középpont közelében megfigyelhető alakzat – amely a gerincek és keresztbordák hálózatának felel meg – szabályszerűen (bár kissé elmosódottan) megismétlődik egy hatszög hat csúcspontjában. Ez igazolja, hogy a lyukak valóban az egész képre kiterjedő háromszögrácsot alkotnak. Ez a – valójában az egész pikkelyre kiterjedő – fotonikus monokristály hozza létre a felső szárnyfél fémes kék színét, mint azt számítógépes szimulációval is igazoltuk [5].

A lepke szárnyának alsó oldala matt zöld színű. Az iridescencia teljes hiánya miatt arra gondolnánk, hogy valamilyen festékanyag, pigment hozza létre

ezt a színt. A mikroszkópos képek (lásd 6. *ábra*) viszont azt mutatják, hogy az alsó oldal szárnypikkelyein is látható a szivacszerű mikroszerkezet! Megfigyelhetjük mind a SEM-, mind a TEM-képen, hogy ez a mikroszerkezet nem folytonos, hanem 5–10 μm átmérőjű granulákat alkot, és ezen szemcsék különböző, véletlenszerű irányítottságúak. Részletes vizsgálatok [5] segítségével kimutattuk, hogy a szemcsék FCC kristályszerkezetű háromdimenziós lyukrácsot tartalmaznak. Mindegyik szemcse más-más irányítottságú, ezért adott megvilágítási és megfigyelési iránynál más-más színű (kék, zöld, vagy sárga) – de a szemcsék együttes hatásaként homogén zöld színt lát az emberi szem. Valamilyen más megvilágítási, illetve megfigyelési iránynál az egyes szemcsék színe ugyan megváltozik, ám az összes szemcse együttesen megint csak homogén zöld színt ad. Tehát a *Cyanophrys remus* lepke alsó szárnyoldala végül is a megvilágítás és a megfigyelés irányától függetlenül matt zöldnek látszik.

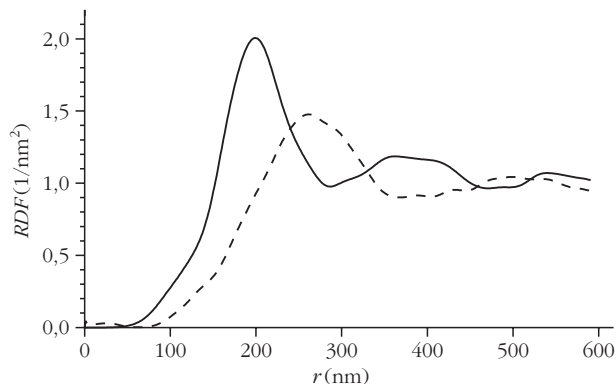
A mikroszkópos képekből származtatott modellszerkezetekre a Maxwell-egyenletekből kiindulva belga kollégáink (*Jean-Pol Vigneron*, Université Notre-Dame-de-la-Paix, Namur) segítségével kiszámoltuk az elméleti optikai spektrumokat a pillangószárny mindkét oldalára, ezek jól egyeznek a mért spektrumokkal.

A rövidtávú rend szerepe

– az *Albulina metallica* szárnyának két oldala

A 7. *ábra* ennek a Himalájában élő lepke szárnyának (hím példány) a felső, illetve alsó oldali SEM- és TEM-képeit mutatja. A SEM-képen a gerincek és a keresztbordák alkotta ablakokon keresztül látható a pikkelyek térfogatát kitöltő lyukrendszer felső rétege. A TEM-képek tanúsága szerint a pikkelyeket réteges szerkezet tölti ki, a rétegek között háromdimenziós szivacsos struktúrát látunk.

Ennek a pillangónak – mint a *címlapon* látjuk – a felső oldala kék, az alsó oldala pedig ezüstös zöld. Ám, ha szabad szemmel megnézzük a 6. *ábrán* a két oldal mikroszkópos képeit, nem fedezünk föl szembezők eltérést köztük. Mi okozza hát a színek eltérését? Ennek kiderítésére mindkét oldal SEM-képeiből kiszámítottuk az úgynevezett radiális eloszlásfüggvényt (*RDF*) – ezeket ábráztoltuk a 8. *ábrán*. A radiális eloszlásfüggvény azt adja meg, hogy ha a középpontban van egy lyuk, akkor milyen valószínűséggel találunk tőle r távolságban egy másik lyukat. Ezt a függvényt gyakran használják amorf anyagok és folyadékok elméleti és kísérleti vizsgálatánál, csak ott az atomokra vonatkozó radiális eloszlásfüggvényt tanulmányozzák. Az *RDF(r)* függvényben mindkét szárnyoldal esetén egy elsőszomszédcsúcsot látunk, a másod- és harmadszomszédcsúcsok lényegesen alacsonyabbak és laposabbak. Ez azt jelenti, hogy az első szomszédok még viszonylag rendezettek, de a második és harmadik szomszédok már sokkal kevésbé. Az *RDF*-függvények természetesen 1-hez konvergálnak, hiszen nagyobb távolságban már teljesen megszűnik a korreláció a lyukak helye között. Azaz a



8. *ábra*. Az *Albulina metallica* lepke szárnyán található szivacsos szerkezetből számolt radiális eloszlásfüggvények a felső oldalra (folytonos vonal) és az alsó oldalra (szaggatott vonal).

szerkezetben nincs hosszútávú rend – ellentétben az előző részben elemzett *Cyanophrys remus* lepke esetével –, de rövidtávú rend azért jelen van. Fordítsuk figyelmünket most az elsőszomszédcsúcsokra! A felső oldalon az elsőszomszédcsúcs $r_1 = 206$ nm sugárnál található, az alsó oldalon $r_1 = 260$ nm sugárnál, továbbá a felső oldali *RDF*-csúcs lényegesen magasabb és keskenyebb, mint az alsó oldal esetén. Egyszerű Bragg-reflexió közelítésben maradván azt mondhatjuk, hogy az első szomszédok helye határozza meg döntően a színt és $\lambda_d = 2 n_{eff} r_1$, ahol n_{eff} a szerkezet átlagos törésmutatója, r_1 az elsőszomszédhéj sugara, λ_d pedig a domináns hullámhossz. (Az átlagos törésmutatót a szerkezetnek a mikroszkópi képekből megállapítható kitöltöttségi tényezője ismeretében a kitin és a levegő törésmutatójából számolhatjuk ki, ebből $n_{eff} = 1,1$.) Ebből az egyszerű számolásból a felső oldalra $\lambda_d = 453$ nm, az alsó oldalra $\lambda_d = 572$ nm adódik, ami egy liláskék és egy sárgászöld szín – jó egyezésben a mért spektrummal. Minél magasabb és élesebb az elsőszomszédcsúcs az *RDF*-függvényben, annál tisztább a szín. Ez magyarázza, hogy a felső oldalon tiszta kék színt, az alsó oldalon viszont ezüstös zöld színt látunk.

Összefoglalás

A Természettől ellesett anyagok és szerkezetek lehetővé teszik biomimetikus, illetve bioinspirált anyagok és technológiák kifejlesztését. A természetben található megoldások általában multifunkciósak (a lepke szárnya például nemcsak egy optikai eszköz, hanem repülésre is szolgál!), energia- és anyaghatékonyak. Az evolúció 500 millió év alatt a fotonikus szerkezetek óriási gazdagságát hozta létre a pillangók szárnyán – csak két, kis törésmutató-különbségű anyag, a kitin és a levegő felhasználásával. Habár a mai technológiával a háromdimenziós fotonikus kristályok nehezen megvalósíthatóak, a lepkéktől megtanulhatjuk, hogy nem szükséges tökéletes hosszútávú rend a tiltott sáv létrejöttéhez. Láttuk azt is, hogy rendezetlen szerkezetekkel nemcsak fémes, hanem matt színek is létrehozhatók – ez lehetőséget teremt környezetbarát

(nehézfémeket nem tartalmazó) festékek, valamint napfényben is jól látható kijelzők létrehozására.

A biológiai eredetű fotonikus kristályokkal kapcsolatos kutatásaink részletes ismertetése, alkalmazási példák és hivatkozások a www.nanotechnology.hu honlapunkon találhatóak.

Irodalom

1. Eli Yablonovitch, Photonic Crystals: Semiconductors of Light. *Scientific American* (2001/12) 47

2. Gyulai József, Az emberiség útja a nanovilág felé. *Mindentudás Egyeteme* (2003), <http://www.nanotechnology.hu/magyarul/Mindentudas/Mindentudas%20Egyeteme.htm>
3. Rajkovits Zsuzsanna, Illy Judit, Az élő természet színei. *Fizikai Szemle* 51/3 (2001) 76
4. Biró László Péter, Nanovilág: a szén nanocsőtől a kék lepkeszárnyig. *Fizikai Szemle* 53/11 (2003) 385
5. K. Kertész et al, Gleaming and dull surface textures from photonic-crystal-type nanostructures in the butterfly *Cyanophrys remus*. *Physical Review E* 74 (2006) 021922
6. Bálint Zsolt, Biró László Péter, A lepkék színváltozása. *Természet Világa* 135/7 (2004) 310

SZERKEZETI SZÍNEK AZ ÉLŐVILÁGBAN

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE Anyagfizikai Tanszék

„A természet egyszerre nagyszerű művész,
kreatív tudós és rendkívül jártas kézműves.”

Kurt Nassau

A színek kialakulása az élővilágban rendkívül összetett jelenség, megértéséhez kémiai, fizikai és biológiai ismeretekre egyaránt szükségünk van, amelyek összekapcsolása lehetővé teszi a természeti jelenségek mélyebb megértését.

Mint annyi más területen is, a színek keletkezésének fizikai alapjelenségein túl a biológiai rendszerek várnak bennünket szinte kimeríthetetlen sokféleségükkel és azzal a kihívással, hogy ezt a sokféleséget fizikai tudásunkkal összhangba hozzuk. Hogy ez az összhang a fizikai ismeretek milyen széles körét alkalmazva teremthető meg, azt a *Fizikai Szemle* ugyanebben a számában, az előző írásban *Márk Géza István* és szerzőtársai a lepkeszárnyak strukturális színeinek példáján mutatták be. Ez az írás, túl azon az esztétikai élvezeten, amelyet egy természeti jelenség megértése okoz, azt is bemutatja, hogy a megértést megfelelő technológiai feltételek megléte esetén – adott esetben korunk nagy újdonságának, a nanoméreték fizikájának köszönhetően – rögtön felmerül a gyakorlati alkalmazások gondolata is. Ez indította a jelen cikk szerzőjét arra, hogy – a Fő-szerkesztő ösztönzésének engedve – a szerkezeti színek élővilágbeli előfordulásának legcsodálatosabb példájáról ezt az összeállítást itt közlétegye annak ellenére, hogy igen sok részletét egy korábbi cikkben a *Fizikai Szemle*ben már leírta [1]. Igaz, azt „csak” a megértés öröme, és a tanítás szempontjai motiválták.

A színek a biológiai rendszerekben, a madarak és rovarok világában gyakran festékszemcsékben, úgynevezett *pigmentek*ben keletkeznek, a „kémiai színezés”-nél megismert hullámhosszfüggő fényelnyelés útján. Bizonyos esetekben azonban a színek kialakulása a *fény* egy meghatározott *szerkezeten* történő szelektív *szóródásának*, *interferenciájának*, illetve *diffrakciójának* következménye. A szórással, interferenciával és diffrakcióval létrejövő színeket *szerkezeti* vagy *struktúraszínek*nek nevezzük [2]. Az interferenciával és diffrakcióval keletkező szerkezeti színek rendszerint visszavert fényben láthatók jól.

Fényszórás

Ha az anyag atomjai, molekulái a beeső sugárzás hatására másodlagos sugárzás forrásává válnak, a *fényszórás* jelenségéről beszélünk. A sugárzás természete függ a beeső sugárzás λ hullámhosszának és a részecske a méretének arányától. Ha a fényt szóró részecske mérete a fény hullámhosszánál sokkal kisebb, akkor a fényszórást *Rayleigh-szórás*nak nevezzük. A *szórt intenzitás* ekkor erősen függ a hullámhossztól, a *Rayleigh-törvény* szerint fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával. Például az úgynevezett Tyndall-kék szín Rayleigh-szórással jön létre. Erőteljes kék szórás figyelhető meg azokon a részecskéken, melyeknek átmérője 1 nm és 300 nm közé esik. Jó szórócentrum lehet akár néhány atom vagy molekula is. A szórt fény színének kék és lila közötti pontos árnyalata a szórócentrumok eloszlásától, méretétől, alakjától is függ.

Ha a szórt részecskék mérete eléri vagy felülmúlja a hullámhossz nagyságát, a Rayleigh-közelítés már nem alkalmazható. A nagyobb részecskéken bekövetkező szórást *Mie-szórás*nak nevezzük. Gömb alakú részecskék esetén, ha a méretük λ és 2λ közé esik, a szórás a beeső sugárzás haladásának irányában egyre intenzívebbé válik. A részecskeméret további növekedésekor már csak fehér szórás figyelhető meg, az intenzitás nem függ többé a hullámhossztól. Ez az a fehér szín, amelyet például a köd vagy az alacsony felhők vízcseppeiben átnézve láthatunk. Az intenzitás-eloszlás meghatározása Mie-szórás esetén nagyon bonyolult, különösen akkor, ha a szórt részecskék mérete különböző. A módszer nagyon jól használható kolloid oldatok, aeroszolok, köd, füst vizsgálatokkor a részecskék méretének meghatározására.

A Rayleigh-szórás látványos példája az élettelen természetben az ég kék, valamint a felkelő és lemenő Nap piros színe. Miközben a fény áthalad a vastag levegőrétegen, spektruma a rövidebb hullámhosszú



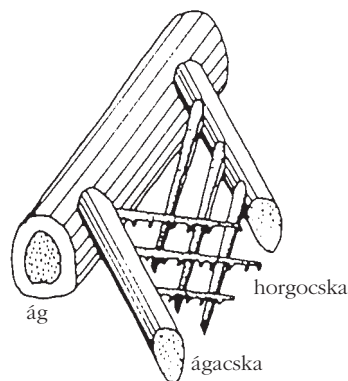
1. ábra. Kékszajkó

(kék) sávban a szóródás következtében jobban gyengül, emiatt a nagyobb hullámhosszúságú sáv intenzitása relatíve megnő. Szemünk a Napot ilyenkor piros színűnek érzékeli. A fény szóródás erősödik, ha nagy mennyiségű finom részecske kerül a felső lég rétegekbe. Példaként említhetünk két megtörtént eseményt is: 1883-ban a Krakatau vulkán kitörésekor a levegőbe került sok apró porszemcse különösen mélyvörös naplementét eredményezett, és ez a látványos jelenség több mint három évig fennmaradt.

Erdőtűzekkor a felhevült fákból szerves anyag párolog a levegőbe, zömmel apró gyanta- vagy olajcseppek formájában, ami szintén csodálatos naplementét okozhat. Ha az olajcseppek mérete 500 nm körül van, a Nap vagy a Hold zöld vagy kék színűnek látszik. A jelenséget észlelték 1950-ben, amikor egy nagy kanadai erdőtűz után hatalmas felhő húzódott át az Atlanti-óceánon Európába.

Az élő természetben a növények között a Tyndall-kék szerkezeti szín elég ritka, gyakori azonban az állatvilágban. Az alapvető biológiai szórócentrumok a szövetekben található levegővel telt üregek vagy zsírcseppek, protein, keratin vagy guanin kristályok, amelyek általában sötét melaninréteg felett helyezkednek el.

3. ábra. Sziámi macska



2. ábra. Madártoll vázának szerkezete

A legtöbb nem irizáló kék szín, például a kékszajkó (1. ábra) színe, tiszta szórás eredménye. A zöld és a bíbor szín kialakulásában is szerepe lehet fény szórási folyamatnak, ha a szóródás sárga, illetve piros színt eredményező abszorpcióval kombinálódik. Ilyenkor a szórócentrumokat tartalmazó réteg mögött pigment is jelen van. A közkedvelt barát papagáj zöld színe hasonlóan alakul ki. Tiszta kék színt akkor látunk, ha a melaninréteg fekete, amely a kéknél kevésbé szóródott összes fényt elnyeli. A madártollak esetében a színezés az úgynevezett ágacska felületén történik.

A 2. ábrán egy madártoll vázának szerkezetét mutatjuk be. A kampókkal ellátott ágacska egymást átfedve az ágak között helyezkednek el. Az ágacska három különböző anyagréteg fed: felül egy körülbelül 10 μm vastag, átlátszó szaruréteg van. Ez alatt helyezkednek el a szórásért felelős cellák, legalul pedig egy sötét melaninréteg található. A cellák szabálytalan alakú, 30–300 nm átlagos méretű, levegőt tartalmazó üregekből állnak. Az üregek az aktuális szórócentrumok. Három egyszerűen elvégezhető kísérlettel könnyen meggyőződhetünk a fenti szerkezeti felépítésről:

a) Ha a kék tollat alkoholba mártjuk, a légbuborékok folyadékkal telnek meg, törésmutatójuk megváltozik. Ennek következményeként a kék szín eltűnik, a fekete melanin válik láthatóvá. Az alkohol elpárolgásával a toll visszanyeri eredeti kék színét.

b) A toll elveszíti kék színét akkor is, ha kalapáccsal szétroncsoljuk a cellaszerkezetet.

c) Ha a melaninréteget hidrogén-peroxiddal kifehérítjük, a kék szín akkor is eltűnik. Ismét megjelenik azonban, ha az ágacska hátoldalát feketére festjük. Ez azt jelenti, hogy a hidrogén-peroxid a szórócentrumokban nem tett kárt.

Szilva, kökény, kék szem

A vizes közegben jelenlévő protein-, zsíradék részecskék, illetve rostos szövet finom keverékén történő fény szóródás következménye a szem kék színe. Nemcsak embereknél gyakori, hanem néhány állatnál, például a 3. ábrán látható sziámi macskánál is megfigyelhető. A szivárványhártyáról való szóródással létrejövő szép kék szín kialakulását háttérként segíti a sötét melanint tartalmazó *uvea* réteg. Magunk is előállíthatunk hasonló módon kék színt, ha kevés tejet



4. ábra. Kőkény

öntünk fekete asztalra. A tejben lévő zsírcseppek mérete éppen akkora, hogy a kék fény szóródik rajtuk, a fehér fény többi alkotóját pedig a fekete asztal elnyeli.

A kék szem korrallal járó fakulása a szóró részecskék méretnövekedésének eredménye. A nagyobb szórócentrumok jelenlétében ugyanis a kék Rayleigh-szórás helyett egyre inkább a fehér Mie-szórás válik uralkodóvá [3].

5. ábra. Szitakötő



6. ábra. Házi légy



A szilva és a kőkény (4. ábra) szép kék színüket annak köszönhetik, hogy a fény a felületüket borító vékony viaszrétegen szóródik. Ezt a réteget akár a kezünkkel is letörölhetjük, ekkor a hamvaskék színük eltűnik, s megfigyelhető a fehér fény többi összetevőjét elnyelő sötétbarna háttér.

Fényinterferencia

A jelenség: két vagy több hullám szuperpozíciójával létrejövő hullámjelenség. Az eredő hullám intenzitását a szuperponálódott hullámok fázisa és polarizációja határozza meg.

A biológiai rendszereknél megfigyelhető *irizáló színek* többsége *többrétegű szerkezeten* kialakuló *vékonyréteg-interferencia* eredménye. Az irizáló színezés szivárványszínű jelenség, különböző színeket látunk attól függően, hogy milyen szögből nézzük a felületet. Ugyanezt tapasztalhatjuk vékony szappanhártyák esetén is. A szappanhártyára eső fehér fény a hártya első és hátsó felületéről visszaverődve úgynevezett vékonyréteg-interferencia eredményeként színeire bomlik.

A növényvilágban az interferenciaszínek ritkák, csupán néhány moha, illetve nedves tengeri alga esetén figyelhetők meg. Az algák kiszáradás után elveszítik irizáló tulajdonságukat [2]. Az állatvilágban azonban gyakrabban előfordulnak irizáló színek, rovarok, bogarak, madarak, sőt emlősök között is találkozhatunk velük.

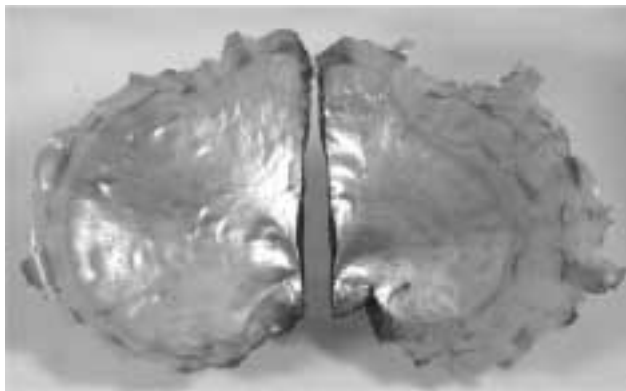
Szitakötők, legyek

A szappanhártyák, illetve vízben úszó olajfolt felületén is megfigyelhető egyrétegű interferencia eredménye néhány rovar, bogár átlátszó szárnyának fémes fénye. Szép példa erre a szitakötő és a házi légy. Ha a szárny vékonyabb, mint 50 nm, akkor már nem látszik színesnek. A szárny belső rétegében ugyanis szinte nem lép fel útkülönbség a találkozó hullámok között, s az optikailag sűrűbb közegről történő visszaverődéskor fellépő π fázisugrás minden színre gyengítő (kioltó) interferenciát eredményez.

Érdekes, hogy az 5. ábrán látható szitakötő esetében nemcsak a szárny, hanem testének egyes részei is biológiai festés miatt színesek. A testen tapasztalható kék színt fényszórás okozza. A rovar a fejlődése egyik fázisában ugyanis kámfort választ ki magából, ami vékony rétegben befedi testét, s a benne lévő részecskéken a kék fény szóródik. A vastagabb szárnyak irizáló interferenciaszíneket mutatnak. A 6. ábrán látható házi légy szárnya 500 nm vastag.

Kagylók, csigák

Vékonyréteg-interferencia okozza a kalcium-karbonát tartalmú kagylók csillogását, az igazgyöngyök színét, a tengeri kagylók és csigaházak gyöngyházfényét is. Egy kagyló irizáló belső felületét mutatja a 7. ábra.

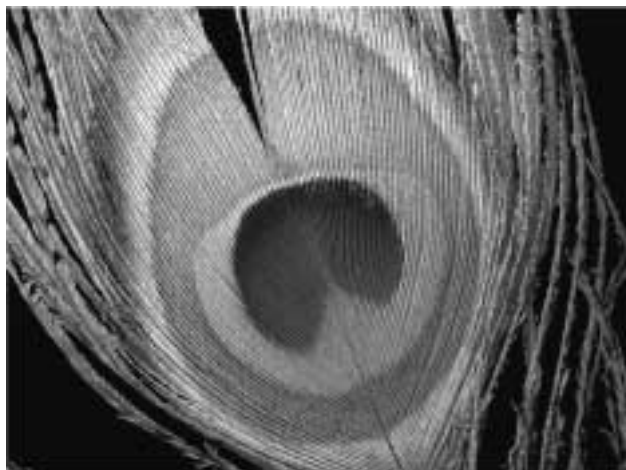


7. ábra. Kagyló belseje

Páva

A pávatoll (8. ábra) színei irizáló színek, változnak, ha a tollat forgatjuk. A színek kialakulásának mechanizmusa már évszázadokkal ezelőtt sok tudóst foglalkoztatott (*R. Hooke, I. Newton, Rayleigh*), de keletkezésükre elfogadható magyarázat csak a 20. században született. A szerkezetvizsgálati módszerek fejlődésével manapság egyre finomabb felbontásban ismerhetjük meg a biológiai szerkezeteket, s ennek megfelelően egészíthetjük ki korábban megfogalmazott megállapításainkat a színek keletkezését illetően. Az utóbbi 10 évben derült fény a nanoskálán építkező élővilág lenyűgöző, változatos szerkezeteire, az úgynevezett fotonikus kristályokra, amelyek a látható fénnel kölcsönhatva eredményezik azt a színgazdagságot, amelyet különösen szembeűnően a páváknál és az irizáló lepkéknél tapasztalhatunk. A tollakon, a szárnyakon gyakran megfigyelhető olyan szerkezet, amely a fény hullámhosszával összemérhető vastagságú, periodikusan ismétlődő, változó törésmutatójú rétegekből áll. A felső rétegre eső fény az egyes rétegekben történő többszöri visszaverődés és fénytörés után szemünkben *egy adott hullámhosszra* erősítő interferenciát eredményez. A természet gyakran a kék szín előállításánál él ezzel a lehetőséggel.

8. ábra Pávászem



A nanovilágban alkalmazott terminológiával élve azt mondhatjuk, hogy az ilyen szerkezet, mint egydimenziós fotonikus kristály, erre a frekvenciára tiltott átmenettel rendelkezik. Megjegyezzük, hogy a színek keletkezésének pontos leírásakor a szilárdtestfizikából megismert sávmélethez hasonlóan kezelik a fotonikus kristályok és a fény (fotonok) kölcsönhatását. A fotonok mozgása a fotonikus kristályokban hasonló az elektronok kristályos anyagokban történő mozgásához. Ezért az egy adott szerkezetről történő nagy intenzitású szelektív fényvisszaverődést úgy értelmezhetjük, hogy az ilyen frekvenciájú fény nem terjed a fotonikus kristályban, erre a frekvenciára tiltott sáv jelenik meg. A továbbiakban itt inkább a középiskolában használatos fizikai optikai megfogalmazásokkal élünk, amelyekkel szintén értelmezhető a jelenségek.

Kolibri

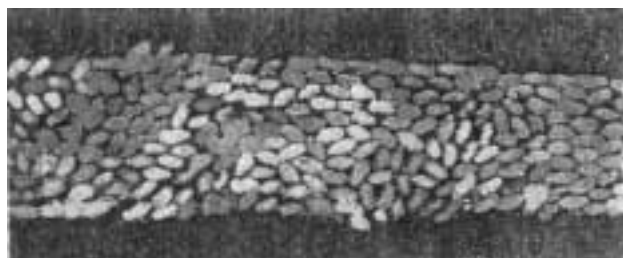
A kolibrít (9. ábra) a „természet drágakövének” is szokták nevezni. Gyönyörű színeinek köszönhetően úgy tűnik, mintha mindig izzásban, ragyogásban lenne.

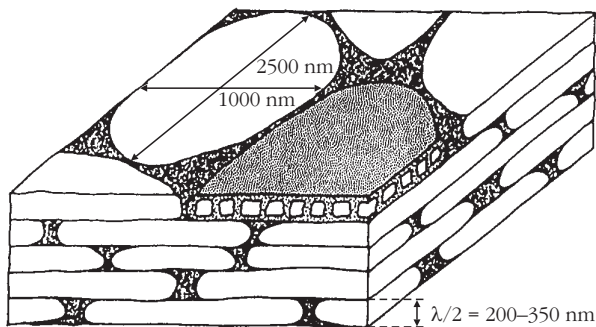
A madártollak esetén a színezés az ágacskák felületén jön létre. A kolibri szárnyán lévő $200 \times 100 \mu\text{m}$ méretű ágacskákat $1 \times 2,5 \mu\text{m}$ nagyságú, ovális lemezek százaiból álló mozaikréteg fedi, amint az a 10. ábrán látható. A lemezek vastagsága és törésmutatója akár ugyanazon madár tollának különböző helyein is nagyon változatos lehet. Ahol a törésmutató például $n = 1,85$, ott a tollak piros színűnek, ahol pedig $n = 1,5$

9. ábra. Kolibri



10. ábra. Mozaik mikroszerkezet a kolibri szárnyán





11. ábra. A kolibri tollának finomszerkezete

ott kéknek látszanak. Az összes lemez ugyanabból az $n = 2$ törésmutatójú anyagból áll, de a tényleges törésmutató az anyaghoz kevert levegő arányától függően ennél szinte mindig kisebb érték [2].

A 11. ábrán egy kolibri tollának felületi szerkezete látható. Ahogy a szín változik pirosból a zöldön át a kékig, a lemezek vastagsága egyre csökken. A lemezvastagság olyan, hogy az effektív optikai úthossz megközelítőleg a domináns szín hullámhosszának a fele.

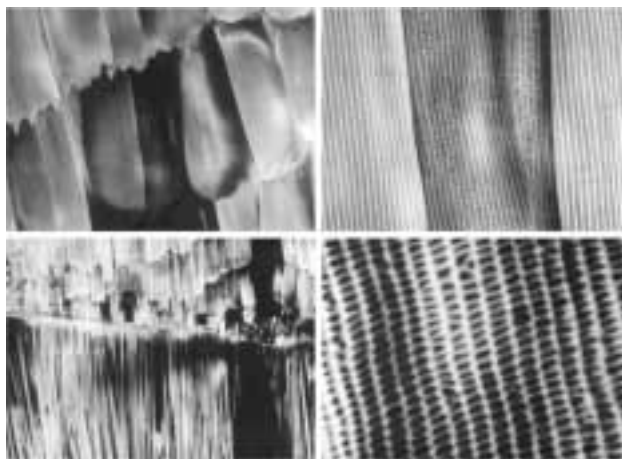
Emlősök

Az emlősállatok körme, haja, szeme szintén mutathat irizáló színeket. Sötét haj esetén a hajszálak felületén mikroszkóp alatt láthatunk csillogó interferenciaszíneket. Ha sötétben, például autóban utazva megvilágítjuk egyes gerinces állatok szemét, akkor az fémes fényűen csillog. Ezek a reflexiók a „choroid” rétegben kialakuló többrétegű interferencia eredményeként jönnek létre. A macska szeme 15 rétegű, és kedvező körülmények között gyönyörű fémes zöld reflexiót mutat. Kissé különböző szerkezet eredményezheti a kutyák esetén tapasztalható sárga színt.

Lepkék

A legszebb, fémes fényű kék színeket (metáلكék) a lepkéknél figyelhetjük meg, amely eredete néhány *Morpho* családba tartozó trópusi lepkefajnál dominánsan vékonyréteg-interferencia eredménye [2].

Manapság nagy igyekezettel kutatják a lepkék színezési technikáját, a nanoszerkezetek megismerésével szinte naponta tesznek újabb és újabb felfedezéseket e téren. A *Fizikai Szemlének* e számában Márk Gézáék tollából is olvashattunk a legújabb felfedezésekről, ezért itt most csak a fotonikus kristályok megjelenéséig megszületett eredményekről számolunk be. A korábbi elméletek kissé egyszerűsítve, többrétegű vékonyréteg-interferenciával magyarázzák az irizáló kék keletkezését, amely az azóta megismert valóságnak csak egy része. A finomabb részletek felderítése újabb mechanizmusok működését is tisztázta, így az irizáló színek kialakításában más felderített struktúrákon (kétdimenziós fotonikus kristályok) történő diffrakciónak is szerepet tulajdonítanak [5].



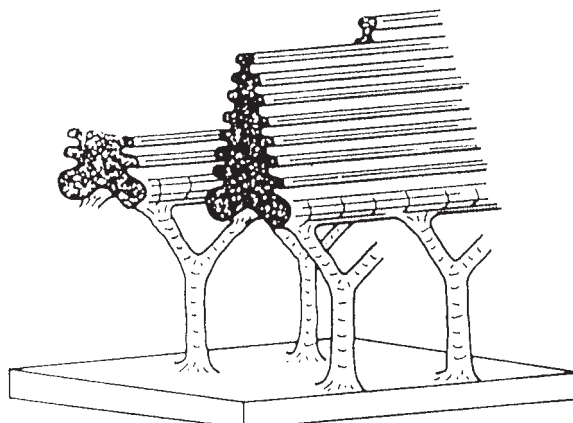
12. ábra. Pikkelyek szerkezete boglárkalepke szárnyán

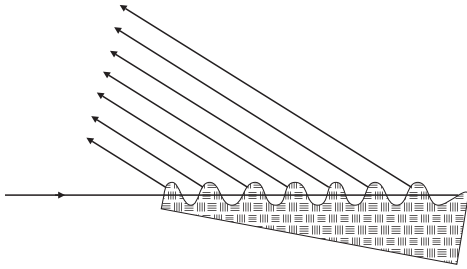


13. ábra. A Dél-Amerikában honos *Morpho* lepke

A pikkelyréteg (12. ábra) a lepkék szárnyán a szárnyfelületet lemezesen, a tetőcseréphez hasonlóan borítja. A Dél-Amerikában honos, 13 cm-es szárnyátávolságú *Morpho* (13. ábra) példányán a lemezek 0,1 mm méretűek, rajtuk körülbelül 200 nm széles bordázat látható. Ha a szerkezetet nagyobb felbontásban is szemügyre vesszük, akkor észrevehető a bordázat lábakon álló, háztetőszerű finomabb szerkezete (14. ábra). A bordák elrendezésének keresztmetszeti képén jelöltük a szárnyat érő és a felületről visszaverődő fény-

14. ábra. A *Morpho Retenor* szárnyának szerkezete





15. ábra. Többretegű interferencia a bordázaton

sugarakat (15. ábra). E példányon a bordák törésmutatója $n = 1,5$, a borda és a légrés vastagsága egyaránt 90 nm. Az effektív optikai útkülönbség (merőleges megfigyelés esetén) $90 \text{ nm} + 1,5 \times 90 \text{ nm} = 225 \text{ nm}$, amely éppen a 450 nm hullámhosszú kék fény hullámhosszának fele [2, 5].

Fényelhajlás (diffrakció)

Ha a hullámterjedés útjába a hullámhosszal összemérhető nagyságú akadály kerül, akkor az akadály mögött is észlelünk hullámjelenséget. A jelenség az elhajlás, vagy diffrakció. A fényelhajlás jelensége optikai réssel, ráccsal tanulmányozható. Ha a periodikus szerkezetről visszavert fény interferenciája eredményezi az elhajlási képet, akkor az elhajlás reflexiós diffrakciós rácsról történt. Periodikus szerkezeteken történő elhajlásra, diffrakcióra az élővilágban is találunk példát.

Indigókígyó

Az indigókígyó (16. ábra) levedlett bőre kétdimenziós, két különböző periodicitást tartalmazó diffrakciós rácsként működik (17. ábra). Az ismétlődő egységek egymástól való távolságát elektronmikroszkópos vizsgálatokkal meghatározták, és jó egyezést találtak a más módszerrel – a spektrometriás analízissel – kapott eredményekkel.

A levedlett bőr egy részletének külső felülete, a CD lemezhez hasonlóan, reflexiós diffrakciós rácsként

16. ábra. Az indigókígyó



működik. Jól látható a hullámos mintázat a 17.b ábrán, a hullámvonallal párhuzamos, illetve merőleges rácsparaméter $d = 1 \mu\text{m}$, illetve $d = 2,5 \mu\text{m}$ [4]. A viszonylag nagy rácsállandók ellenére, a kígyó erősen görbült bőrfelületéről a szinte mindig teljesülő sűrűdő beesés miatt, a bőr periodicitása kisebb látszólagos rácsállandóval jellemezhető. A szemünkbe jutó visszavert fény két különböző hullámhosszú összetevője együttesen eredményezi az indigó színhatást. A levedlett kígyóbőrrel szintelen anyagból készült replika (elektronmikroszkópos vizsgálathoz szükséges lenyomat), hasonló periodicitásának köszönhetően, szintén indigó színűnek látszott.

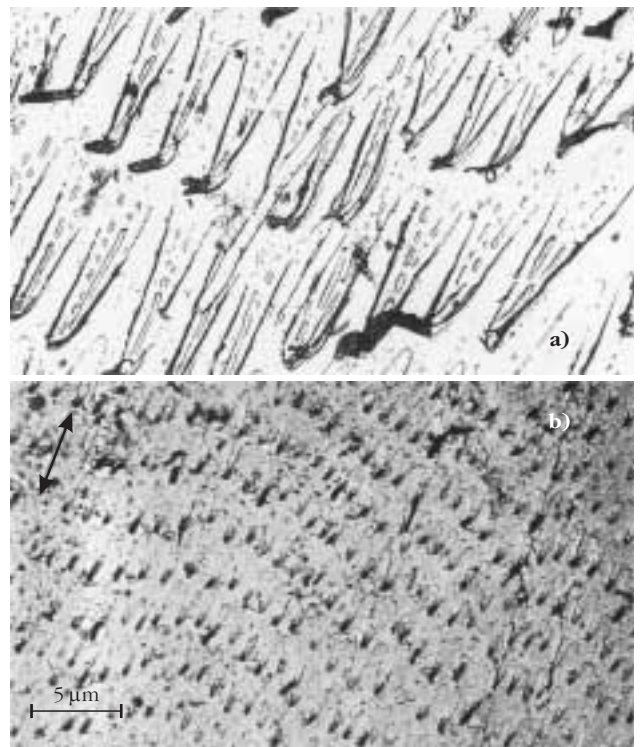
Összefoglalás

A teljesség igénye nélkül próbáltunk bepillantást nyújtani az élővilág színeit kialakító mechanizmusokba. Az érdeklődő olvasók az e témához kapcsolódó, napjainkban felfedezett kiegészítéseket a nanotechnológia eredményeiről szóló, internetes és nyomtatott folyóiratokban publikált cikkekből szerezhetik meg. A hazai kutatásokat is tartalmazó nemzetközi együttműködés legfrissebb eredményeiről a www.nanotechnology.hu című honlapról értesülhetnek.

Irodalom

1. Rajkovits Zsuzsanna, Illy Judit, *Fizikai Szemle* 51 (2001) 76–80
2. K. Nassau, *The Physics and Chemistry of Colors: The Fifteen Causes of Colors*. John Wiley & Sons, 1983.
3. Neugebauer Tibor, *Fizikai Szemle* 21 (1971) 33–48
4. E.A. Monroe, S.E. Monroe, *Science* 159 (1968) 97–98
5. Mohan Srinivasarao, *Chemical Reviews* 99 (1999) 1935–1961

17. ábra. Az indigókígyó bőrének szerkezete



Kezdetek: CGS és SI

1970-ben végeztem az ELTE fizikus szakán, és akkor még a fizikában a CGS-rendszer Gauss-féle változata dívott: minden más mértékegységet a centiméter, gramm és másodperc segítségével fejeztünk ki. Ennek persze elképesztő következményei voltak. Az erő egysége még hagyján: *Newton* első törvénye alapján egysége a dyn lett ($1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$, egy szűnyog húzóereje), de az elektromágnesség egységei annyira bonyolultak voltak, hogy nem írtuk ki őket, csak azt mondtuk, például, hogy elektrosztatikus töltésegység. A utóbbi játszva származtatható volt a Coulomb-törvény CGS-alakjából (amelyben a vákuum permittivitása egységnyi), mint az erő négyzetgyöke szorozva a távolsággal, azaz $\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Nem csoda, hogy a fizika különböző ágai bevezették a saját egységeiket. Jómagam az atomi egységekkel keveredtem többször összetűzésbe. Elméleti fizikusok az atomi folyamatok számításakor nagy előszeretettel fejezik ki eredményeiket a.u.-ban, és mindig komoly erőfeszítésembe került azokat valamilyen kezelhető-mérhető egységgé alakítanom. Az energia esete könnyű: a Rydberg-energia kétszerese, tehát az energiára $1 \text{ a.u.} = 27,2 \text{ eV}$. 1 eV energiára tesz szert egy elektron, amikor átszel 1 V feszültséget (ifjúkoromban ezt még *feszültségkülönbség*nek hívtuk: nemcsak az egységek változnak, hanem a szóhasználat is). A tudományom itt meg is állt, és minden alkalommal, amikor, például, *igazi* távolságra (vagy hullámhosszra) volt szükségem valamilyen atomi egységben kifejezett számítás alapján, el kellett kezdenem lapozni a kézikönyveket.

Különösen szórakoztató az atomi tömegegység, az ugyanis időben és térben változik. Az atomfizikában korábban a ^{16}O atomsúlyának a 16-od részével, újabban pedig a ^{12}C -é 12-ed részével ($1,660538 \times 10^{-27} \text{ kg}$) definiálják, még szerencse, hogy ez majdnem egyenlő a proton tömegével ($1,672621 \times 10^{-27} \text{ kg}$), az meg közel van jelenlegi kedvenc tömegegységemhez, a GeV/c^2 -hez ($1 \text{ GeV}/c^2 = 1,782661 \times 10^{-27} \text{ kg}$). Ugyanakkor a kémiai skála a természetes oxigén atomi tömege, azaz a természetben előforduló oxigénizotópok keverékében mért átlagos atomtömeg 16-od részét tekintette egységnyinek, amely persze vagy fél százalékkal kisebb volt.

Bár kezdetben kicsit bosszantott, hogy a vákuumnak hirtelen egységnyitől eltérő permittivitása és permeabilitása lett, a tömegalapegység meg a logikusabb gramm helyett a kg lett, a konkrét számításokat mégis nagymértékben megkönnyítette az MKSA (m, kg, s, amper), majd az abból kinőtt SI-rendszer használata. Eltűnt egy sor történelmi mértékegység, mint a mágneses térerősség gaussa, a nyomás atmoszférája vagy a radioaktivitás curie-je. Természetesen ezt

is időbe telt megszoknom, de a tesla esete igazán könnyű volt: $1 \text{ tesla} = 10 \text{ kilogauss}$.

Elismerem, hogy a curie-nél a becquerel sokkal logikusabb egység, hiszen $1 \text{ Bq} = 1 \text{ bomlás}/\text{s}$, míg $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$, viszont vegyük észre, hogy a Bq annyira kicsi aktivitás, hogy a gyakorlatban leggyakrabban a millió- (MBq) és milliárdszorosa (GBq) használatos. Ezzel együtt is gyorsan meghonosodott a használata.

Miután Dubnában töltöttem 5 évet, itthon bekapcsolódtam a KFKI Mössbauer-laboratóriumának munkájába. A mössbaueresek (mire mi így hívtuk magunkat, *Rudolf Mössbauer* már a GALLEX neutrínófizikai kísérletben vett részt) kedvenc forrása az ^{57}Co , amellyel az ^{57}Fe stabil izotóp megfelelő átmenetét gerjesztik. Az átmenet energiája $14,4 \text{ keV}$ (kiloelektronvolt) ugyan, de a mérés annyira pontos, hogy az energiaspektrum letapogatásához a forrásból kijövő foton energiáját a céltárgy mozgásával (Doppler-hatás) változtatják. Így tehát a vizsgált anyagra jellemző, mért energiakülönbségeket a mozgás sebességével fejezik ki, azaz általában mm/s egységben. Ez tehát egy újabb energiaegység, és ember legyen a talpán, aki kapásból meg tudja mondani, hány eV-nak felel meg (tekintsük házi feladatnak).

Hosszúság

1982-ben kezdődött együttműködésem a kanadai TRIUMF intézettel. A nevét a TRI-University Meson Facility (három egyetem mezonyára) kezdőbetűiből kapta, de már akkor négy egyetem alkotta. Kanada nemrég tért át a metrikus egységekre (gondolom, ebben *Pierre Trudeau* francia kormányzásának is szerepe volt). A boltokban kg-ban kellett kiírni az egységárakat (állandó kérdés volt az eladóhoz: *az mennyi*, mármint fontonként) és a sebességkorlátozó KRESZ-táblák is km/h-ban szóltak, de ezzel nagyjából véget is ért a metrikus rendszer érvénye Vancouverben. Az amerikai gyártmányú autók, műszerek és szerszámgépek mind angolszász egységekben működtek. Észak-Amerikában persze nem így hívják: Kanadában birodalmi (*imperial*) egységeknél, Amerikában *standard* mértékrendszernek, de a közhasználatú súlymértékeikre használják a frangolul hangzó *avoirdupois* szót is. Ezek az elnevezések Magyarországról nézve viccesek, hiszen mitől lenne standard az USA mértékrendszere Amerikán kívül, a szóbanforgó birodalom pedig a brit birodalom, amelynek akkor Kanada már csak névleg volt része, és egyébként is, Kanadában az angolszász egységek amerikai változatát használták, nem az angolt.

A hüvelyk ($1 \text{ inch} = 25,4 \text{ mm}$) egészenként jól kezelhető, mert a négyeszerese nagyjából 10 cm . A baj az

amerikai mérőszalaggal az, hogy a hüvelyket nem tizedre, hanem kettesével osztja. Amikor a kísérlet geometriáját igyekeztünk feltérképezni, és valamelyikünk mérte a távolságot, hogy például 11 láb és 5 egész 11/32 hüvelyk, és a következő méret, mondjuk, 10 egész 3/8 hüvelyk volt, akkor nekem bizony nehezemre esett a kettőt kivonnom egymásból. Bonyolultabb esetben átszámoltuk a részadatokat méterre, összeadtuk-kivontuk, aztán visszaszámoltuk láb+hüvelykre, hogy *közérthető* legyen.

Egyszer ottani barátaink megkérdezték, milyen magas vagyok. Mondtam, hogy 195 cm, mire visszakérdeztek, hogy az mennyi. Előkaptam a kalkulátoromat, és közöltem, hogy mintegy 77 inch. Látva az értetlen arcokat, elosztottam 12-vel: 6,4 láb jött ki, és az sem volt jó. De amikor visszaszorozva a 0,4 lábat 12-vel, kijött 6'5", akkor azt mondták: nahát, tényleg magas vagy!

Első rajzomat a TRIUMF mechanikai műhelyében komoly derűtség fogadta, mert mm-ben skáláztam. Elismerték, hogy Kanada metrikus, de a gépeik mind amerikaiak voltak, tehát megkértek, méretezzem át érthető egységekre. Megtettem, kicsi szerkezetről lett lévén szó, mil-ben, amely ugyan a hivatalos definíció szerint a yard 3600-ad része, viszont éppen egy ezred inch. A menetekkel viszont bajban voltam, mert fogalmam sem volt, mit írjak az M1-es csavarok helyére. Kérésre a művezető a „0-80”-asat javasolta, mint jó kicsit. Meglepetésemre csavarokat a kész szerkezethez nem kaptam: Kiderült, hogy olyan kicsi csavarok Vancouverben nem léteznek, Kanada másik végéből, Torontóból kellett hozatnom őket.

Rengeteg angolszász hosszúságegység van, és a legtöbbet használják is, például 1 line (vonal) = 1/40 hüvelyk (0,635 mm), 12 hüvelyk = 1 láb (foot, 304,8 mm), 3 láb = 1 yard, 1 fathom = 2 yard és néhány közbülsőt átugorva 1 mérföld (mile) = 1760 yard = 1609 m. A köznapiban elég tudnunk, hogy a yard kicsit kevesebb, mint 1 m, a mérföld meg valamivel több, mint másfél km. A naiv közep európai vendég fő problémája nem maga az egység, hanem a különböző egységek közötti véletlenszerű szorzófaktor. Ráadásul a legtöbb mértékegység amerikai és brit definíciója különbözik: a yard esetén ez kicsi, 10^{-5} körüli, de számomra annál érthetlenebb.

A hüvelyktől Európában sem szabadultam. Első antiprotonos kísérletünkhöz japán kollégáim amerikai kriosztátot és gáztargetet vásároltak, amely, természetesen, amerikai méretezésű alkatrészekkel rendelkezett. Ahhoz, hogy a CERN metrikus rendszeréhez csatlakoztassuk, rengeteg átmenetet kellett készítenünk, rövid rézcsöveket egyik felén metrikus, másikon angolszász menetű csatolókkal. 1993-ban hosszú órákat töltöttem azzal, hogy szortíroztam ezeket a menetes szerelvényeket és filctollal ráírtam az amerikaiakra a méretet, a hazait ugyanis ránézésre meg lehet becsülni. Biztosan az amerikaiakat is, csak nem nekünk, és főleg nem, ha összekeveredtek a metrikusakkal. Az egyik gyakori méret, 3/8 hüvelyk, például, közel 10 mm, viszont a menete egészen más; a kettő nem

megy egymásba, ami gyakran akkor derült ki, amikor már tönkretettük az erőltetéssel.

Amerikában viszont tapasztaltam a yardnak, mint hosszúságegységnek egy rendkívül praktikus használatát. A legtöbb településen a házszámok valahonnan, többnyire a városközponttól kezdve utcánként százzal ugranak, úgyhogy könnyű a térkép alapján utazási távolságot becsülni, és azt, hogy egy keresett cím melyik két kereszttutca közé esik. Ráadásul a házak számát meg gyakran az határozza meg, milyen messze vannak a blokk végétől, tehát nincs kavarodás, ha egy telket megosztanak. Az a cím tehát, hogy *3952 East 57th Avenue* azt jelentheti, hogy az adott ház az 57. kelet–nyugati utca keleti felén van, a 39. blokkban, mintegy 52 távolságegységnyire (pl. yardra) a keresztdődtől. Az európai módszer persze jóval izgalmasabb az összevissza kezdődő és befejeződő, véletlenszerűen elnevezett, tekervényes utcákkal és az utca elején mindig újakezdődő házszámozással. A tokiói címek még érdekesebbek: a városrész nevét három szám követi, az első egy kis városnegyedé, a második egy blokké, a harmadik pedig a házszám a blokkon belül, amelyet kis térképek mutatnak hirdetőoszlopon. Utcanevekre persze így nincs is szükség.

Terület

Egészen mostanáig fennmaradt Magyarországon néhány régi, nem-metrikus mértékegység, mint a *bold* és a *négyszögöl*, de kihalóban vannak. Azt persze tudjuk, hogy egy telek 200-as, ha hétszáz-valahány négyzetméter, de ez is lassan elmúlik, mint ahogy a mezőgazdaságban is eluralkodott a hektár.

Amerikában a lakások és kis telkek területét négyzetlábban, a nagyobbakat, mint az országokét pedig négyzetmérföldben mérik.

Térfogat

Az SI, a m^3 és társai mellett megengedi a litert és mellette a hektolitert, decilitert és centilitert, az utóbbiakat nyilván történeti okokból.

A térfogat logikus angolszász mértékegysége, természetesen, köbhüvelyk (cu in), köbláb (cu ft), köbyard stb., de vannak egészen sajátosak is, mint a folyadék-uncia (fluid ounce), ebben mérik az élelmiszereket. 1 fl oz = 28,4 és 29,6 cm^3 Angliában, illetve Amerikában, és ez nem a köbösített hüvelyk különbsége, hanem a különböző gallonoké, az amerikai gallon ugyanis éppen 231 US-köbhüvelyk, azaz 3,785 liter, szemben a brit gallonnal, amely sokkal több, 4,546 liter. Az italt viszont kvarthban (*quart*) és pintben mérik, amely a gallonok negyed, illetve nyolcadrésze. A quart nem tévesztendő össze a *quarter*rel, amely sokkal nagyobb, Angliában 64 gallon. Kanadában vettem egy ősrégi, hatalmas amerikai autót, a motorja 480 köb-inch volt, azaz csaknem 8 literes; a tankjába, ha jól emlékszem, 30 USA-gallon benzint fért.

Egyébként a naív idegen megzavarására minden anyagot másféle űrmértékben mérnek, a búzát, például, *bushel*ben, amely Angliában 8 gallon, Amerikában pedig köbhüvelykben definiálják, de literben nem pontosan annyira jön ki. A kőolaj mértéke a hordó, amely az egyszerűség kedvéért Angliában 36 gallon (*barrel oil*), az USA-ban pedig 42 gallon (*petroleum barrel*), egyébiránt pedig majdnem pontosan egyenlőek 159 liter körül. A lexikon szerint van még jó pár egzotikus angolszász térfogategység, de azokkal, szerencsére, nem volt alkalmam találkozni. Jó sok angol egységet sorol fel egyébként a <http://home.clara.net/brianp/quickref.html> honlap.

Súly, tömeg

Első találkozásom az angolszász egységekkel egy londoni szállodában történt, amikor ráálltam a fürdőszobáméltre: el nem tudtam képzelni, milyen súlyegységben nyomhatok 12-t. Otthon aztán utánanézttem: ők a testsúlyt stone-ban mérik (kő), amely 6,35 kg. Ez szerencsére Amerikában nem ismeretes, ott a testsúlyt fontban mérik. Furcsa, hogy a *pound* szót lb-vel jelölik a latin *libra* után.

A rengeteg angolszász tömegegység attól is függ, mit mérünk vele: a patikában és az ékszerészetben egészen más tömegegységeket használnak, de ez nyomaiban nálunk is megmaradt, mint például a *karát*. Ami nagyon rendes tőlük: az angolszász tonna ugyanannyi Angliában és Amerikában és közeli a metrikushoz: 1 *ton* = 1016 kg. Persze ez sem ilyen egyszerű, mert Amerikában használják a *rövid tonnát* is, amely pontosan 2000 font, tehát csak 907 kg.

Nyomás

Kezdetben volt a *torr*, más néven higanymilliméter (Hgmm): 1 mm higanyoszlop nyomása. Mivel a metrikus súlyt a vízzel definiáljuk és a légköri nyomás közel 10 m vízszlopénak felel meg, valamivel metrikusabb az atmoszféra: 1 atm \equiv 760 torr = 1,013 kg/cm². Metrikus, de nem SI a *bar* vagy régebbi nevén *technikai atmoszféra*, at: 1 bar = 1 kg/cm². Vákuumméréshez használt kisebb egysége a mbar.

A nyomás SI-egysége, a pascal (1 Pa = 1 kg/m², 1 atm = 101325 Pa) kemény dió, nehezen megy át a használatba. CERN-es kollégáimmal a vákuumot és kis nyomást még ma is torrban, illetve jobb esetben millibarban fejezzük ki azon egyszerű okból, hogy a piacon kapható műszerek leginkább azt mutatják (bár fogadni mernék, hogy programozhatók lennének pascalban is). Még ma is látni időnként hPa-ban adott nyomásértéket: pseudo-SI ugyan, mert a hekto nem elfogadott ugrószám, csak az ezresek azok (kivétel a már említett hektoliter és a hPa), viszont 1 hPa jó közelítéssel 1 mbar. Mielőtt felháborodnánk eme pontatlanságon, gondoljuk meg, ez a közelítés még mindig mennyivel jobb, mint a mbar-t és a torr-t nagyjából

azonosnak venni, pedig azzal is jópárszor találkoztam már, persze csak 10⁻⁵ mbar alatti vákuumra, amelynek mérése már inkább csak nagyságrendi.

A megfelelő angolszász mértékegység a font/négyzet hüvelyk (*pound-per-square-inch, psi*). Az összes amerikai műszer ebben mért. Előnye, hogy közeli az atmoszférához, 1 bar = 14,2 psi, és legalább tizedes mértékben osztódott. Hátránya, hogy nehéz kapásból 14-gyel osztani, amikor bar-ra szeretnénk átszámítani.

Hőmérséklet

A mi *celsius*-fokunk remek, mert abból lett a fizika *kelvin*je. A *reaumure* régen kihalt, bár gyermekkoromban még voltak abban mérő hőmérők az utcán. Az angolszász *fahrenheit* viszont él és virul, de számomra reménytelen: nemcsak nem tudtam hozzászokni, de változatlanul számológépre van szükségem, hogy fogalmam legyen róla, mennyi is, például 40 F celsiusban: még a 32-t hamar levonom belőle, de az osztás 1,8-del már meghaladja a fejszámolási képességet. Szegény amerikai kollégák itt is két egység között őrlődnek, hiszen a fizika az általuk némi logikával *centigrade*-nek nevezett celsiust használja, amíg otthon a sütő vagy a szoba hőmérsékletét és a gyerek lázát fahrenheitben mérik. Az utóbbi esetben viszont kidomborodik a fahrenheit előnye: könnyű megjegyezni, hogy 100 F fölött célszerű orvost hívni (Fahrenheit a *t* = 100 F-et a saját testhőmérsékletéhez igazította, nyilván lázas volt éppen).

A történeti igazság kedvéért azért meg kell említenem, hogy ha ma a fahrenheit mint mértékegység, meglehetősen értelmetlennek tűnik is, *D. G. Fahrenheit* német fizikus csaknem 300 évvel ezelőtt készítette első hőmérőjét, és utána még vagy 200 éven keresztül a Fahrenheit-féle hőmérők voltak a legpontosabbak.

Atomfizikai energia: eV, angström, nm, GHz

Első CERN-i kísérleteim az alacsonyenergiás antiproton-gyűrűnél zajlottak, kezdetben olasz, majd japán-német munkatársakkal együttműködésben (az előbbi esetben tényleg zajlottak, utána inkább csak folytak). A japán kísérletben antiproton-átmenetek energiáját mértük atomokban lézerspektroszkópia segítségével. A vizsgált átmeneti energiák a látható fény tartományába estek, tehát 2 eV körüliek voltak. A festéklézereknek, a dolgok természetéből fakadóan, a hullámhosszát szabályoztuk a rezonátor méretével, és ennek megfelelően az atomi átmeneteket hullámhosszban, nanométer egységekben kaptuk. A kalibráló vonalakat, történeti okokból, angströmben tabellázták, de azt csak 10-zel kellett osztanunk, egyszerű volt. Elméleti kollégáink azonban a cikk elején emlegetett atomi egységekben szerették megadni számításaik eredményét, amelyet nekünk kellett nm-re átszámolnunk, amíg rá nem vettük őket, hogy tabellázzák számunkra

nm-ben is (ez nekik csak egyetlen sorral jelentett többet a programkódjukban).

A nehézségek akkor kezdődtek, amikor a mérési pontosságunk kezdte elérni az igazi atomfizikusokét, akik az összes mennyiséget frekvenciában szerették kifejezni, és tőlünk is azt kérték. A hullámhosszakat továbbra is nm-ben kapjuk, de a korrekciókat, a Doppler- és instrumentális kiszélesedést és más szisztematikus hatásokat GHz-ben és MHz-ben kellett kifejeznünk, mert azok voltak többé-kevésbé függetlenek a konkrét tanulmányozott átmenettől.

Nagyenergiájú fizika

Jelenlegi fő területemen, a nagyenergiájú fizikában csaknem kizárólag két mértékegységet használunk, a GeV-et és a pikobarnt. Az, hogy az energia mértékegysége a GeV (1 GeV = 10^9 eV) nem meglepő, hiszen a nagy gyorsítók ma már TeV, azaz 10^{12} eV fölöttiek. Nem túlzottan érdekes és nehéz is észlelni a GeV alatti részecskéket. Még az is könnyen megemészthető, hogy az $E = mc^2$ Einstein-reláció alapján és a fénysebességet egységnyinek véve a tömegeket is GeV-ben mérjük, illetve a könnyebbekét MeV-ben. Igényesebb kollégák GeV/ c^2 -et, illetve MeV/ c^2 -et írnak, de kisebbségben vannak. Innen már igen apró lépés a p lendületet (idősebbek kedvéért: impulzust) is GeV-ben, illetve pontosabban GeV/ c -ben kifejezni, hiszen a nagyenergiájú részecskék gyakorlatilag mind relativisztikusak, és zérus tömeg esetén $E = pc$.

Az instabil részecskék élettartama már kicsit bonyolultabb eset. Az exponenciális bomlás időfüggésének energiában a Breit–Wigner-féle rezonancia Lorentz-függvénye felel meg, amely szerint a bomló állapot energiaeloszlása

$$W(E) \sim \frac{1}{(E - M)^2 + \Gamma^2/4},$$

ahol a csúcs M maximumhelye a bomló részecske tömege, Γ szélessége pedig az élettartammal fordítottan arányos (ezt gyakran hozzák téves ok-okozati összefüggésbe a Heisenberg-féle határozatlansági relációval, holott csak az eredetük hasonló). A rövid életű állapotok élettartamát tehát célszerű a rezonanciájuk szélességével jellemezni, amely GeV, így lesz az idő mértékegysége GeV $^{-1}$. Az azonban már tényleg furcsa, amikor – tekintettel arra, hogy a lendületet is GeV-ben mérjük, és a távolság a lendülettel hasonló viszonyban van, mint az időtartam az energiával – az igen kicsi távolságokat időnként GeV $^{-1}$ egységekben mérik.

A nagyenergiájú fizika gyakorlatilag kizárólag energiát és *hatáskeresztmetszetet* mér, az utóbbival lehet ugyanis a legegyszerűbben kifejezni azt, hogy két egymásnak repülő részecske milyen valószínűséggel lép kölcsönhatásba. Történeti okokból a hatáskeresztmetszet egysége a *barn*, 1 barn = 10^{-28} m 2 . Ez első ránézésre ugyan kicsinek tűnik, de a neve nem véletlen: már a keresztzülei tudták, hogy nagy lesz, azért

nevezték így el (a barn angolul *csúirt* jelent). A nagyenergiájú fizika jellegzetes folyamatai pikobarn (azaz 10^{-12} barn) körüli hatáskeresztmetszettel rendelkeznek, bár mostanában a ritka folyamatoknál a femtobarn (10^{-15} barn) is gyakran előfordul. Mivel pedig az álló céltárgyas kísérletek *fluxusát* és az ütközőnyalábok *luminozitását* egyaránt a felületegységen időegység alatt áthaladó vagy ütköző részecskék számával, azaz cm $^{-2}$ ·s $^{-1}$ egységben mérjük, a legegyszerűbb azt is barnnal kifejezni. A teljes vagy integrális luminozitást a luminozitás idő szerinti felösszegzésével, integrálásával kapjuk a gyorsító működésének idejére. A LEP, például, működése utolsó évében, 2000-ben, mintegy $\mathcal{L} = 220$ pb $^{-1}$ integrális luminozitású elektron–pozitron ütközést produkált 200 GeV körüli ütközési energiával. Ebből könnyű megmondani, mennyi eseményt várunk egy ismert hatáskeresztmetszetű reakcióból: ha például a vizsgált hatáskeresztmetszet 2 pb, az észlelési határfokunk pedig a szimulációk szerint 50%, akkor $\mathcal{L} = 100$ pb $^{-1}$ luminozitásnál 100 eseményt várhatunk.

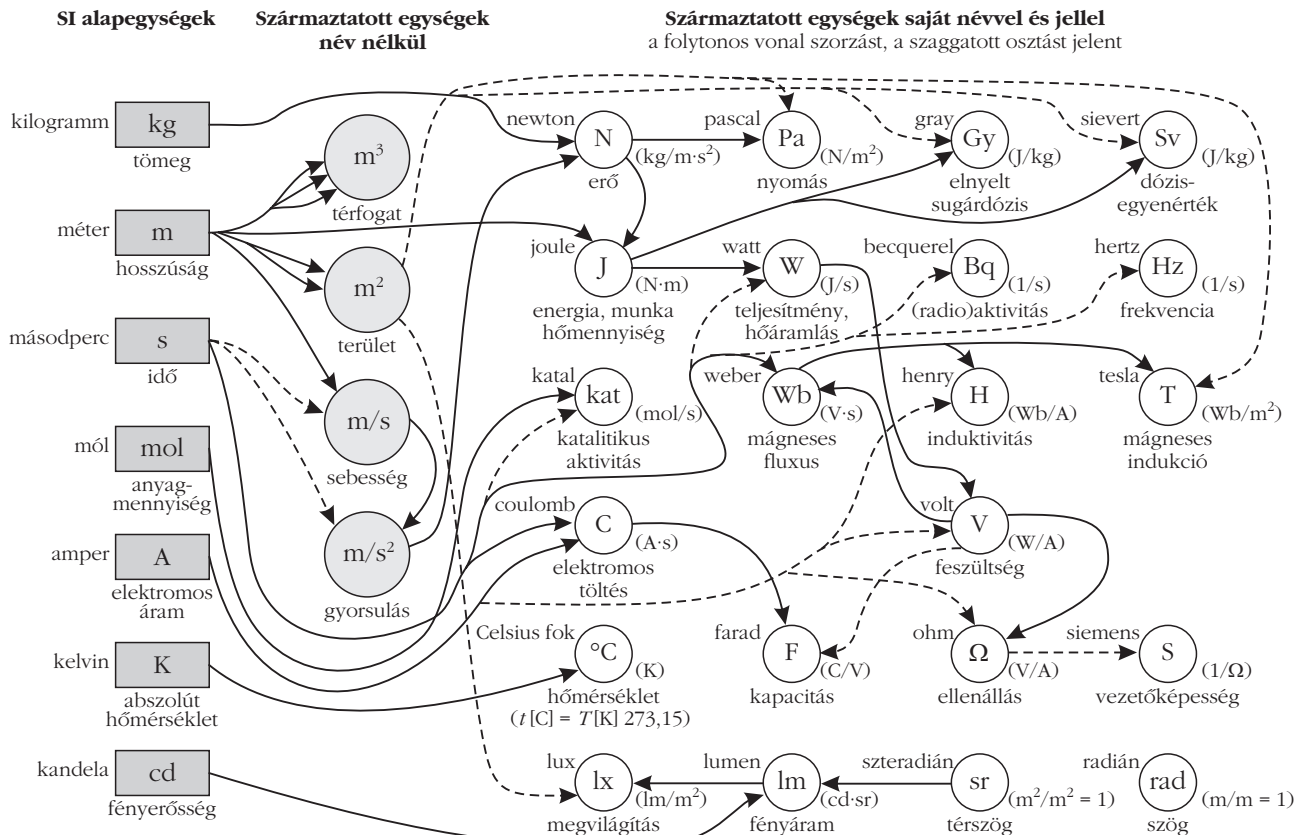
Érdekes a részecskefizika szögmérése is. Egy nagyenergiájú elektron–pozitron, proton–proton vagy nehézion-ütközést követően a szélrózsa minden irányába repülnek szét a részecskék. A fizikai analízishez azonosítanunk kell az azonos irányban kibocsátott *hadronzáporok* egymáshoz tartozó részecskéit, és ehhez az egyes részecskék pályájának távolságát egymástól célszerű a lendületvektoruk közötti szöggel definiálni. Ezt a LEP gyorsítónál szöggel, illetve annak koszinuszával fejeztük ki. A protonütköztetőknél viszont a polárszög helyett *pszeudorapiditást* használunk, amelynek definíciója $\eta = -\ln \Theta/2$, ahol Θ a részecske és a nyaláb közötti szög (Θ a részecskefizika kedvenc görög betűje, mindenféle szöget jelölünk vele, még az állapotok keveredésére vonatkozókat is). Az ilyen ütközéseknél a legtöbb kirepülő részecske nyalábirányú háttéreseményhez tartozik, tehát annál érdekesebb valami, minél merőlegesebb a lendületvektora a protonnyaláb irányára. Ugyanakkor a pszeudorapiditás csak a nyalábtól való szögtávolságot jellemzi, a részecskepályák egymáshoz képesti távolságához célszerű bevenni a Φ azimutuszöveget is, amely a gyorsítóknál használatos koordinátarendszerben, ahol a nyaláb iránya a z -tengely, a nyalábra merőleges síkra vetített szög. Az LHC-kísérletekben tehát a részecskepályák távolságát szög helyett a

$$\Delta R = \sqrt{\eta^2 + \Phi^2}$$

mennyiséggel jellemezzük.

Éljenek a metrikus egységek!

Számomra a metrikus rendszer legszebb része az ezres váltószámok: a méterből így lesz kilométer és femtométer (amely történetesen régebben fermi volt), a s-ből ns és a kg-ból ... no, itt egy kis dadogást észlelünk, hogy nem a gramm az alapegység és a mega-



1. ábra. Az SI-mértékegységek összesítése. Balról jobbra az alap, az elsődleges és másodlagos származtatott SI-egységek. Feltüntettük az egységek nevét, jelét és származtatását; az utóbbit mind képlettel, mind pedig összekötő vonalakkal. A folytonos vonalak szorzást jelentenek, azaz a kiinduló mennyiség szorzótényezőként szerepel a nyíllal jelölt végegység származtatásánál, a szaggatott vonal pedig osztást.

gramm tonna maradt, de a milligramm és mikrogramm működik. Szegény angolok nagyon szenvedhettek, amikor a régi, megszokott pénzrendszerükről (1 shilling = 12 penny, 1 font = 20 shilling, 1 guinea = 21 shilling) át kellett térniük az 1 font = 100 penny fantáziátlan és unalmas rendszerére.

A tudomány metrikus és a közélet angolszász hosszúságegységei meglehetősen zavart jelentenek Amerikában. Számomra a legelképezetőbb példa erre a 650 millió dolláros *Mars Climate Orbiter* űrmisszió, amely a NASA hivatalos elemzése szerint főként azért veszett oda, mert 57 mérföld helyett 57 km magasan léptették be a Mars légkörébe. A jelentés persze ennél diplomatikusabban fogalmaz: egyrészt közli a tény, hogy 80–90 km magasság helyett 57 km-en lépett be a légkörbe, másrészt pedig hibaként felrója, hogy nem váltottak át bizonyos mennyiségeket angolszászról metrikus egységekre.

Amikor egy fiatal kanadai munkatársamnak panaszkodtam, milyen nehéz megszokni az angolszász

mértékegységeket, rákérdezett, mi, magyarok, mennyire vagyunk metrikusak. Közöltem, hogy maximálisan. Erre jöttek a keresztkérdések: Mekkora a súlyom? Mondom, 76 kg, de nálunk úgy kérdezik: hány kiló vagy. Mekkora a lakásom területe? 64 m². Némi gondolkodás után felcsillant a szeme: hány tojás van egy dobozban? Mondom, tíz. Erre kifakadt: miféle ország lehet az, ahol 12 helyett 10 tojást raknak egy dobozba? Mosolyogva mondtam: metrikus.

Ezt a cikket elsősorban a saját szórakoztatásomra írtam, és csak reménykedhetem benne, hogy az olvasóira is. *Trócsányi Zoltán* barátom viszont azt tanácsolta, tegyem hasznossá azzal, hogy hozzárakok egy ábrát az eredeti és származtatott SI-egységekről. Többféle van forgalomban, angol nyelvű minta alapján felépítettem egyet magyarul. A másodlagos mértékegységeket általában szorzással-osztással kapjuk az eredetiekből: a folytonos vonalak a nyíl irányában szorzást, a szaggatottak osztást jelentenek. Köszönöm a tippet, Zoli!

KITÜNTETÉS

Az Európai Fizikai Társulat Tanácsa 2007. március 23–24-i londoni ülésén a nukleáris szilárdtestfizika magas színvonalú műveléséért és a magyar és európai fizi-

kus közösségnek tett lelkes szolgálataiért *Nagy Dénes Lajost* az EPS tiszteleti tagjává (EPS Fellow) választotta. Az ülésen 8 EPS Fellow-t választottak meg.

HÁLÓZATI PING-PONG

– avagy a fény sebességének számítógépes mérése

Szász Ágota

Bolyai Farkas Elméleti Líceum,
Marosvásárhely, Románia

Néda Zoltán

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar,
Kolozsvár, Románia

„Billió mérföldekről jött e fény, ...
Terek sötétjén lankadatlanul,
S ki tudja mennyi évezté már.”

Tóth Árpád: *Lélektől lélekig*

Az itt felvázolt téma ötletét az sugallta, hogy még a szűkebb fizikusi környezetünkben is csak nagyon kevesen láttak fénysebesség-mérési kísérletet. A legtöbbben elhiszük az eredményt, és megelégszünk annyival, hogy ez egy rettentően nagy sebesség, aminek mérése nehézkes. Érdekes azonban elgondolkodnunk azon, hogy a fénysebesség egy nagyon fontos fizikai mennyiség, amelynek döntő szerepe van a modern fizika logikájának felépítésében, a tér és az idő fizikai értelmezésében. Ezen mennyiség mérése lényeges ahhoz, hogy fizikai gondolkodásunkat szilárd alapokra helyezzük. Célunk egy egyszerű, könnyen, olcsón (bizonyos esetekben ingyen) és bárhol elvégezhető, korszerű fénysebesség-mérési módszer leírása, amelyet a számítógépeknél használt „ping” utasítás felhasználásával lehet megvalósítani. Az ötlet egy korábban publikált dolgozaton alapszik [1], amelyben azt írtuk le, hogy hogyan lehet mérni a PING utasítás felhasználásával az elektromágneses jelek terjedési sebességét hálózati kábeleken. A bemutatásra szánt módszer elvi szempontból is érdekes, ugyanis megtanít arra, hogy a mérést befolyásoló zaj sok esetben hasznos, és hozzásegít ahhoz, hogy akár a mérőberendezésünk érzékenysége (felbontóképessége) által megengedett értéknél pontosabb eredményt kapjunk. Amit bemutatunk, ahhoz hasonló, mintha egy jól reprodukálható milliszekundumos időintervallumot „homokórával” mérnénk. Ez a mérést befolyásoló szekundumos nagyságrendű zaj felhasználásával lehetséges úgy, hogy a mérést sokszor megismételjük, és az eredményeket megfelelő módon statisztikailag feldolgozzuk.

Módszerünk pontatlanabb a modern lézeres technikáknál, nagy értéke viszont az, hogy iskolai feltételek mellett is szemléletesen alkalmazható. A fény vagy általában az elektromágneses hullámok sebességének mérése ezzel az érdekes és tanulságos laboratóriumi kísérlettel jó alkalmat ad a középiskolás diákok kutatásba való bevonására, és a mérési adatok statisztikus feldolgozásának a megismerésére. Sok érdekes és még kihasználatlan eredményt lehet kapni a mikrohullámok terjedésére, törésére, illetve visszaverődésére vonatkozóan is. Kétféle mérést fogunk bemutatni, fénykábeleken, illetve vezeték nélküli (wireless) hálózaton kapott eredményeket tárgyalva.

Mi a „ping” és mit tud?

A ping a legtöbb operációs rendszerben (Windows, Linux, Unix) működő egyszerű utasítás, amellyel egy másik számítógép hálózati elérhetőségét tesztelik. A ping utasítás a következőképpen használható: *ping IP-szám (vagy számítógép Internet neve) [opciók]*.

A *ping 172.22.22.117 [opciók]* 64 byte-os csomagokat küld el a hálózaton keresztül a 172.22.22.117 IP-számmal rendelkező gépnek.

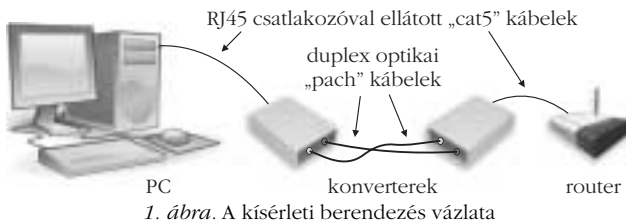
Ha a csomag megérkezik, a másik gép válaszol, és megjelenik, hogy mennyi a csomag kétirányú átfutási ideje a két számítógép között. Egy lehetséges válasz például: *64 bytes from 172.22.22.117: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.376 ms.*

A pinggel történő időmérés pontossága mikroszekundum a Linux operációs rendszer alatt és milliszekundum a Windows operációs rendszerben. Megemlítenéd, hogy Windows alatt létezik egy ingyenesen letölthető program (hrping [3]), amely szintén mikroszekundumos pontossággal méri az átfutási időt.

A ping utasítást rengeteg hasznos opcióval használhatjuk (egy teljes leírásra LINUX alatt használjuk a *man ping* utasítást). Néhány számunkra hasznos opciót a következő példával mutatunk be. A *ping 172.22.22.117 -c N -i dt -s w -p ff* típusú utasításban például *N*-nel megadjuk a küldött csomagok számát, *dt*-vel a küldések közti időintervallum, *w*-vel a csomag nagyságát (*s*-ban, illetve *byte*-ban kifejezve) és *ff*-fel a küldött csomag struktúráját. Számos más opció is létezik, amelyek segítségével majdnem mindent lehet állítani.

Hogyan lehet „ping”-gel fénysebességet mérni?

A kísérlet során megmérjük a küldött jel oda-vissza útjának az átlagos időtartamát. Optikai szál vagy vezeték nélküli lokális hálózatot használunk számítógépről pingelve egy lokális routert (*1. ábra*). Különböző hosszúságú kábeleken (illetve távolságokon a vezeték nélküli hálózatok esetén) nagyon sok pingelést végzünk, és relatív méréseken keresztül próbáljuk a fény, illetve mikrohullámok sebességét megbe-



1. ábra. A kísérleti berendezés vázlatja

csülni. Mivel a fénykábelek és a vezeték nélküli hálózat esetén is aránylag kis távolságokon dolgozunk, a jel által a kábelekben megtett út oda-vissza ideje $1 \mu\text{s}$ alatt van. Ezért, ha ideális számítógépekkel, hálózati kártyákkal és routerekkel dolgoznánk, ilyen rövid távolságokon nem lenne kimutatható időkülönbség. Segít bennünket azonban a rendszerben levő zaj, ami a gépi válaszokhoz tartozó kis késleltetések sokaságából ered. A zaj véletlenszerűen tologatja a ping válaszok idejét, és az ennek megfelelő statisztikából sikerül megbecsülnünk a ping felbontóképességénél kisebb időintervallumokat is. Hogy jobban lássuk, hogyan is történik ez, tekintsünk egy konkrét példát. Tételezzük fel, hogy egy adott úthosszra a ping válasz $10 \mu\text{s}$ lenne. Az idő legnagyobb része a hálózati kártyán és a routeren történő késleltetéseknek tulajdonítható, és csak egy nagyon kis rész (általában $1 \mu\text{s}$ -nál jóval kisebb) az, ami az elektromágneses hullámok véges terjedési sebességéből ered. Mivel a véges terjedési sebességből adódó késés mindig rövidebb $1 \mu\text{s}$ -nál (a ping felbontóképességénél), zaj hiányában mindig ugyanazt a $10 \mu\text{s}$ értéket mérnénk, és ezáltal a véges terjedési sebességre nem tudnánk következtetni. A rendszerben levő zaj, ami szintén μs nagyságrendű, véletlenszerűen tologatja a mért értéket.

Ha elvégzünk 1000 pingelést ugyanolyan körülmények között, azt kaphatjuk, például, hogy 125 esetben $9 \mu\text{s}$, 500 esetben $10 \mu\text{s}$, 375 esetben meg $11 \mu\text{s}$ a válaszidő. Feltételezve, hogy a zaj statisztikai tulajdonságai a kísérlet során változatlanok, a mérés arra fog utalni, hogy a zajos rendszerben a ping átlagos átfutási ideje

$$\frac{9 \cdot 125 + 10 \cdot 500 + 11 \cdot 375}{1000} = 10,25 \mu\text{s}.$$

2. ábra. Lokális hálózat optikai szálakkal



Ha feltételezzük, hogy a rendszerben levő zaj statisztikája nem változik a különböző úthosszak esetén, a mérés sokszori megismétlésével megbecsülhetővé válik a ping felbontása alatti időkülönbség is, és ezáltal mérhető az elektromágneses hullámok véges terjedési sebessége.

Rövid idő alatt nagyszámú pingelést végezhetünk (például 20 perc alatt akár 100 000 pinget) és ezáltal jó statisztikával akár 50 ns nagyságrendű időkülönbségeket is megbízhatóan fel lehet oldani. A pingek eloszlása a valóságban egy sokkal tágabb intervallumban történik, mint ahogy a fenti példán szemléltettük, de a módszer alkalmazhatósága ugyanaz marad.

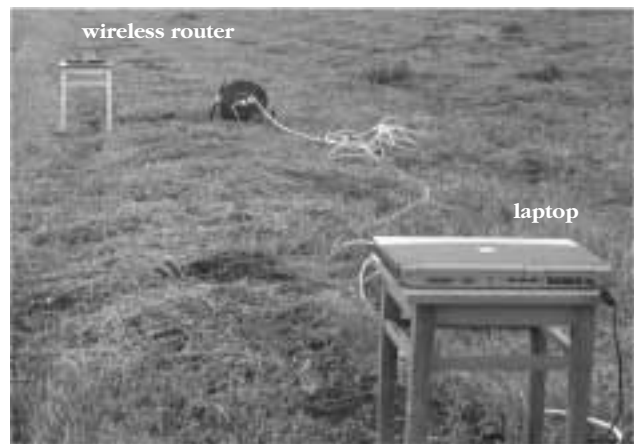
Kísérleti berendezések

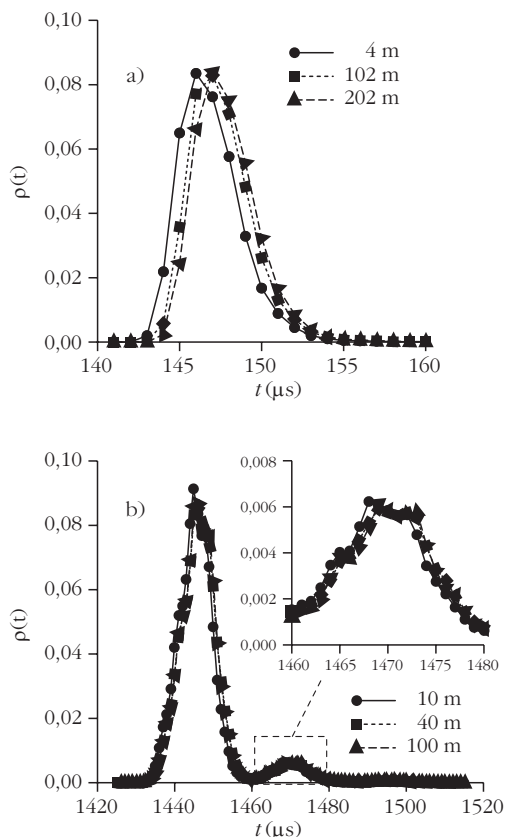
A kísérletek gyakorlati kivitelezéséhez egy LINUX operációs rendszer alatt működő PC-t és egy routert használtunk. Fénykábelekben (2. ábra), illetve vezeték nélküli hálózatokon mértünk (3. ábra). A LINUX operációs rendszer nagy előnye, hogy jól ellenőrizhető, mi történik a rendszerben, és a számítógép „lebutítható” annyira, hogy csak az alap operációs rendszer és a ping utasítás fusson a gépen. Ezáltal a különböző hosszúságú utakon történő mérésekre ugyanazon késleltetések és zajok jelennek meg. A ping utasítást ugyanakkor egy kicsit átírtuk, hogy a kimeneti adat csak a válaszidő legyen mikroszekundumban. A futtatható programunk letölthető a tanulmányunknak szentelt honlapról [4].

Fénykábelek esetén egymódusú, lépcsős indexű szálakat használtunk, amelynek a törésmutatóját a gyártó által kiadott dokumentumból vettük (1300 nm -es infravörös fényre: $n = 1,477$). Különböző hosszúságú szálakkal dolgoztunk (a. oda: 2 m , vissza 2 m ; b. oda: 2 m , vissza 100 m ; c. oda: 2 m , vissza 200 m).

Vezeték nélküli (wireless) hálózatokon egy LINUX alatt futó EMACHINE M5305 (AMD Athlon 2400+) laptop számítógépet a PCMCIA PB6-2086 hálózati kártyával használtuk. A router egy SMC 2404WBR volt, és az általuk kialakított vezeték nélküli hálózat a standard 802.11b protokoll alatt a $2,4 \text{ Ghz}$ mikrohullámok

3. ábra. Lokális vezeték nélküli hálózat





4. ábra. A ping válaszjelek időbeli eloszlásfüggvénye. A felső, a) ábrán a fénykábelek, az alsó, b) ábrán a vezeték nélküli hálózatok mérési eredményei láthatók.

tartományában működött. Hogy a mikrohullámok falról történő visszaverődéseit kiküszöböljük, a méréseket egy mezőn végeztük el (3. ábra), a routert a számítógéptől 5, 10, és 50 m-re elhelyezve.

Mindkét mérés esetén minden távolságon legalább 10^6 számú ping válaszidejét mértük, és ezek statisztikájából próbáltuk meghatározni az elektromágneses hullámok terjedési sebességét. Az eredmények feldolgozásához többféle statisztikai módszert alkalmaztunk, helyhiány miatt itt csak a legegyszerűbbet ismertetjük. Ezen egyszerű módszer lényege az, hogy egy adott válaszidő intervallumban $[t_{\min}, t_{\max}]$ meghatározzuk a mért pingek átlagos válaszidejét. Ennek a különböző úthosszakra történő változásából következtetünk az adott elektromágneses hullám terjedési sebességére.

A mérési eredmények

Az optikai szálakban történő mérések sokkalta jobb és tisztább eredményt szolgáltattak, mint a vezeték nélküli hálózatokon mért értékek. A válaszidők egy nagyságrenddel kisebbek voltak, és ezek eloszlása is sokkalta „tisztább” volt fénykábelek esetén. Ezért hasonló statisztikai feldolgozással a fénykábelekben kapott értékek sokkal jobb fénysebességértéket szolgáltattak. Vezeték nélküli hálózatok esetén a ping válaszidők eloszlásának alakja változik annak függvé-

nyében is, hogy hol mérünk, és ezáltal milyen visszaverődések vannak. Habár a fénysebesség meghatározásának szempontjából ez hátrányt jelent, mégis előnyös lehet a mikrohullámok néhány terjedési tulajdonságának tanulmányozására.

A 4. ábrán szemléltetjük a válaszidők eloszlását a fénykábelekben és a vezeték nélküli hálózatokon való mérések esetén. Fénykábelek esetén a 4, 102 és 202 m-es oda-vissza utakra a válaszidők eloszlásfüggvényét (annak a valószínűségét, hogy egy adott válaszidőt mérjünk) pontokkal, négyzetekkel, illetve háromszögekkel ábrázoltuk (4.a ábra). A hisztogramból jól kivehető a különböző hosszúságú kábelekben mért eloszlások közötti eltolódások. A vezeték nélküli hálózatokban kapott válaszidők eloszlása a 10, 40 és 100 m-es oda-vissza távolságokra csak sokkal nagyobb nagyítás esetén megkülönböztethető (a 4.b ábrán levő kinagyított tartomány).

Fénykábelek esetén többféle $[t_{\min}, t_{\max}]$ intervallumot tekintve, és összehasonlítva a 4, 102 és 202 m-es távolságokon kapott átlagos időkülönbségeket [4] a $v \approx 2,07 \cdot 10^8$ m/s sebesség adódik a fény optikai szálbeli terjedési sebességére. Figyelembe véve az optikai szál törésmutatóját ($n = 1,477$), a légüres térben mért fénysebességre $c = 3,05 \cdot 10^8$ m/s-t kapunk ami 2%-osnál kisebb relatív hibával megközelíti a manapság elfogadott értéket!

Vezeték nélküli hálózatok esetén, amint már jeleztük, az eredmények jóval szerényebbek. Az adatokat hasonlóan feldolgozva, többféle $[t_{\min}, t_{\max}]$ intervallumot tekintve [4], a mikrohullámok terjedési sebességére levegőben a $c = 2,74 \cdot 10^8$ m/s átlagos értéket kaptuk.

Összefoglalás

A számítógépeknél elterjedten használt „ping” utasítás segítségével olcsón és látványosan megbecsülhető az elektromágneses hullámok terjedési sebessége. Fénykábelek használva eredményeink 2 százalékos pontossággal, vezeték nélküli hálózatok esetében nagyságrendileg jól megközelítik a fénysebességre elfogadott értéket [2] ($c \approx 299792,5$ km/s). A bemutatott módszer elvi szempontból is értékes lehet, ugyanis szépen illusztrálja, hogy a mérési pontosság növeléséhez hasznos lehet a zaj. Megfelelő statisztika mellett a zaj segítségével elérhető, hogy a berendezés felbontóképességénél jóval pontosabb méréseket végezzünk. Az általunk végzett kísérletek során kiderült, hogy az itt leírt módszer kitűnően alkalmas a mikrohullámok terjedési tulajdonságainak a vizsgálatára is.

Irodalom

1. J. Lepak, M. Crescimanno, Speed of light measurement using ping. physics/0201053 és American Physical Society – Meeting Abstracts (2002) abstract B2.009.
2. T.G. Blaney, C.C. Bradley, G.J. Edwards, B.W. Jolliffe, D.J.E. Knight, W.R.C. Rowley, K.C. Shotton, P. T. Woods, *Nature* 251 (06 September 1974) 46
3. <http://www.cfos.de/ping/ping.htm>
4. <http://www.phys.ubbcluj.ro/~znedu/ping.html>

TÍZ ÉVES A CSODÁK PALOTÁJA!

Pontosabban, a Csodák Palotájának állandó kiállítása ünnepelte 2006-ban tizedik születésnapját. Az állandó kiállítás megnyitásához hosszú út vezetett el. Ha egészen régre nyúlunk vissza, a név születéséhez, akkor *Óveges József*re kell emlékeznünk. Ő mondta mindig, hogy kellene egy hely, ahol a gyerekek a tudománnyal játszhatnak, kísérletezhetnek – lehetne ennek a neve Csodák Palotája. Neki azonban ezt soha nem sikerült létrehoznia, bár látványos, érdekes, szellemes kísérleteivel tekintélyt szerzett a tudománynak a laikus közönség előtt is.

Akkor egyébként még a világban sem voltak ilyen, angol szóval, kifejező magyar szó híján, *science centerek*. Az első ilyen intézmény a hatvanas évek végén született meg San Franciscóban. *Frank Oppenheimer* (*Robert Oppenheimer* testvére) – aki egyébként maga is dolgozott az Manhattan Projektben – a hatvanas évek végén megszerezte San Franciscóban a városi tanácstól az 1915-ös világkiállításról megmaradt egyetlen épületet, amelyben korábban időszakos kiállításokat, vásárokat tartottak, és itt fizikai kísérleteket állított ki a nagyközönségnek. Ez ma az Exploratorium, a science centerek ősforrása. (Korábban is, a második világháború előtt voltak ilyen kezdeményezések, például a müncheni Deutsches Museumban.)

A nyolcvanas években kezdett az Eötvös Loránd Fizikai Társulat több tagja felfigyelni erre a kezdeményezésre, és *Ferenczi György*, a neves szilárdtestfizikus tekintélyével elérte, hogy, már a kilencvenes évek elején, az ELFT kapott egy jelentős összeget az OMFB-től (akkori elnöke *Pungor Ernő* volt, soroljuk őt is a bábák közé!) arra, hogy elindítsa egy ilyen intézmény, a Csodák Palotája megvalósításának folyamatát. *Ferenczi György* tragikusan korán elhunyt, a gondolat azonban életben maradt. Az ELFT és a Rubik Nemzetközi Alapítvány megalapította a Budapest Science Centre Alapítványt (BSCA) azzal a megfogalmazott céllal, hogy létrehozzon egy állandó interaktív tudományos kiállítást Csodák Palotája néven.

Az alapítvány feladata először a nemzetközi környezet, más, hasonló kiállítások tanulmányozása volt, majd eszközépítési pályázatokat írtak ki. Hamarosan megnyílhatott az első időszakos kiállítás a Műszaki Egyetem aulájában, majd 1994-ben a Közgazdasági Egyetemen. Rövid, egyhetes rendezvények voltak ezek, de a látogatottság megmutatta, hogy az embereket nagyon is érdekli ez a fajta bemutató, ahol nemcsak nézelődni lehet, hanem a tárgyakat meg lehet fogni, kísérletezni lehet velük. Ezért a BSCA elhatározta, hogy egy nagyobb, és hosszabb ideig tartó időszakos kiállítást rendez. Erre sor is került a Vasas Pasaréti-úti teniszcsarnokában, ahol a saját eszközök mellett a pozsonyi *Schola Ludus* eszközeit is bemutatták (a Schola Ludus több utazó interaktív kiállítást épített, állandó kiállítása azonban nincs). A siker óriási volt, hat hét alatt mintegy százharmincezen látták a kiállítást.

E kiállítások sikere meggyőzte a lehetséges támogatókat: van igény egy állandó interaktív tudományos bemutatóra. (Akkoriban a játszóház elnevezést használtuk, ez azonban azt sugallta, hogy elsősorban gyerekeknek szóló látványosságról van szó, holott ezek a bemutatók gyerekek és felnőttek számára egyaránt érdekesek. Ezért a játszóház kifejezés használatát megszüntettük.) Az OMFB (ma NKTH), a Soros Alapítvány és az Oktatási és Kulturális Minisztérium támogatása lehetővé tette egy állandó kiállítóhely megvásárlását. Több helyszín került szóba, egyebek között a mai Millenáris Parkban lévő, akkor még elhanyagolt Ganz épület is – ahol egyébként újabban kapott helyet, egészen más körülmények között, a Csodák Palotája. Végül is a Váci út 19. szám alatti épületrész került megvásárlásra (a Könyvesház egykori épületének egy része). Itt mindenképpen meg kell említeni *Rubik Ernő* nevét, akinek nagyon nagy szerepe volt abban, hogy el tudott indulni a Csodák Palotája. Mivel nem tudtuk készpénzben kifizetni a teljes vételárat, *Rubik Ernő* vállalt értünk kezességét egy több tízmillió forintról szóló váltóval. Később is, amíg küzdelmes



fotó: Zsolt Gábor



fotó: Zsolt Gábor

volt az életünk, nagyon sokat segített például áthidaló hitel szerzésében, de tanácsaival és támogató mellénk állásával is bizonyos vitatott kérdésekben. Aligha túlértékelhető szerepe volt abban, hogy a Palota megmaradt és képes volt fejlődni.

1996. szeptember 28-án nyílt meg a Váci úton Közép- és Kelet-Európa akkor egyetlen állandó interaktív tudományos kiállítása (akkor még játszóház néven). Az augusztus elsején átvett kiállítótermet ehhez teljesen fel kellett újítani, festés, mázolás, a teljes villanszerelés, világítás, padlóburkolás, ruhatár, bolt és büfé kialakítása, mosdók rendberakása, iroda kialakítása, informatikai infrastruktúra megteremtése (az internetet, amely akkor még nagyon újdonság volt, a Matáv adta egy ISDN2 vonal formájában). És akkor még a szakhatósági engedélyekről (pl. tűzoltóság, ÁNTSZ) nem is beszélünk. Ezt követte a kiállítás építése, hivatásos kiállítás-építők segítségével, Nagy Zsolt vezetésével. A tárgyak három forrásból származtak: egyrészt bérbe vettük a Heureka (a finn science center) *Gyermekvilág* című utazó kiállításának egy részét (szögletes kerekű autó, tépőzárfal, holdséta, óriás rugó stb.), másrészt kiállítottuk a korábban meghirdetett eszköztervező pályázat legsikeresebb darabjait, harmadrészt pedig előkerült a korábban már elkészült eszközök egy része is. A kiállításon elhelyeztünk néhány számítógépet is, amelyen internetezni lehetett. (Fontosnak tartottuk, hogy egyike legyünk annak a néhány helynek, ahol nyilvánosan hozzá lehet férni a világháléhoz. Néhány éve azonban már nincs a kiállítóteremben internet, mert ez mindennapjaink alapvető eleme lett, erre már nincs szükség itt.) Ekkor alakult meg a Csodák Palotája Kulturális Közhasznú Társaság, amelynek feladata azóta is a kiállítás üzemeltetése.

Januárban (1997) a kiállítás átépítésre került, mert visszamentek a Heureka eszközei, helyükre a Schola Ludustól bérelt eszközök kerültek. Az átépítést már saját magunk csináltuk. Ekkor kezdtük el a műhely fejlesztését, első szerszámgepünk egy állványos fűrőgép és az én otthonról behozott hegesztőtrafóm volt. Ma már egy sor faipari géppel – szalagfűrész, vastagológyalu stb. –, esztergapaddal, marógéppel, ipari köszörűvel, számítógépes vezérlésű wolframíves hegesztőberendezéssel rendelkezünk. Bizonyos speciális műveleteket ugyan külső műhelyekben végeztünk – lézeres és vizes vágás, pleximegmunkálás –, azonban a legkényesebb munkát igénylő eszközöket is gyakorlatilag magunk tervezzük és készítjük. Ez igaz az informatikai, elektronikai fejlesztésekre is.

Az első év (szeptembertől szeptemberig) mérlege mintegy kétszázezer látogató volt, de a következő évben ez a szám jelentősen visszaesett, csaknem az előző évi szám felére. Ennek legfőbb oka az lehetett, hogy elmúlt az újdonság varázsa, amely odahozta a látogatókat, viszont a kiállítás nem volt elég jó ahhoz, hogy vissza is hozza őket (márpedig a cél nem csak a látogatók behozása, hanem a visszahozása is, az állandó látogatói kör kialakítása). Ezt azonban akkor még nem láttuk világosan, viszont beláttuk, hogy valamilyen kiegészítő bevételre van szükség ahhoz,



fotó: Zsolt Gábor

hogy a Palota életben maradjon. Számos helyről kaptunk támogatást, az OMFB-től és a Soros Alapítványtól is kaptunk további összegeket, de kisebb-nagyobb összegekkel támogatta a Palotát az Ipar Műszaki Fejlesztéséért Alapítvány, a Hírközlési Főfelügyelet és számos más intézmény. Ez azonban nem volt elegendő a pénzügyi egyensúlyhoz, nem beszélve a kiállítás fejlesztéséről. Ezért 1997-ben pályáztunk a Sulinet népszerűsítésére meghirdetett nyolcvan millió forintos közbeszerzési pályázaton (ez nem a munkadíj volt, hanem a tervezett költség, amelyben azonban a munkadíj is benne volt), és ezt meg is nyertük. Ennek egyik haszna volt a megkeresett munkadíj, amely segített az életben maradásban, de nagyon nagy haszon volt az informatikai munkákban való tapasztalatszerzés, a számos kialakult kapcsolat, és a szervezésben szerzett gyakorlat is. A következő másfél év a kiállítás üzemeltetése és (most már csak) évente történő átépítése (új és új témák, jó eszközök kitalálása és megépítése) mellett a Sulinet programmal telt, és az így keregett összeg (amely nemcsak a munkadíjat hozta, hanem részben fedezte több munkatárs bérét is) elegendő volt az életben maradáshoz.

1999 őszén, a Sulinet program végén, újra el kellett gondolkodni azon, miből tudjuk fenntartani magunkat. És ekkor valóságos csoda történt. Miközben elgondolkodva ültem az irodában és éppen azon tör-



tem a fejemet, hogy mit is csináljunk, csengett a telefon. Felvettem, a telefonáló bemutatkozott: „*Tamás István* vagyok, és szeretnék valakivel arról beszélni, hogy hogyan támogathatnám a Csodák Palotáját”. Megbeszéltük, találkoztunk, hosszan beszélgettünk a Palotáról, akkori helyzetünkről, arról, hogy mire is lenne szükségünk, és Tamás István (a Dunaholding akkori elnöke, ma az IBS főigazgatója) mit tud nekünk nyújtani. Néhány beszélgetés után kialakult közöttünk egy egyezség: mi (mármint a Palota) mindent megteszünk azért, hogy fenntartsuk magunkat, minden forrást próbálunk kihasználni, és évente kétszer-háromszor beszámolok arról, hogy e fölött mennyi kiegészítésre van szükségünk, illetve elszámolok az előző időszakban kapott összeggel. (Munkatársaim közül voltak, akik nem értették, miért nem kérek egy nagyobb fix összeget – volt, aki egyebek között emiatt hagyta el a Palotát –, mi azonban pontosan értettük, miben egyeztünk meg. Annyira, hogy ezt soha nem foglaltuk semmilyen szerződésbe, az adott szó viszont mindkettőnk részéről mindig működött.)

Tamás István az elkövetkező néhány évben több tízmillió forinttal támogatta a Palotát, és ami ugyanilyen fontos, nagyon sok jó tanácsot adott a működtetés javításához. A legfontosabb az volt: minőséget kell adni, mert az emberek a minőséget mindig értékelik és meg is fizetik – nem az olcsó belépőjegy a vonzó számukra



elsősorban, hanem a minőségi tartalom. Ez nagyon fontos lökés volt, olyan szemlélet, amelyik bennünket olyan úton indított el, hogy a hasonló nyugat-európai intézményekből ma hozzánk látogató kollégák is elismerik: ez a minőség bárhol megállná a helyét! Mindennek az is volt az eredménye, hogy egyre kevesebb pénzt kellett kérnünk, és néhány év után a Palota önfenntartóvá vált (ami Nyugat-Európában sem magától értetődő teljesítmény, például az egyik legnevesebb science center, a Heureka költségvetésének mindössze negyven százaléka a saját bevétel). Természetesen továbbra is pályázunk különböző helyeken, hogy minél többet fordíthassunk a kiállítás fejlesztésére.

A Csodák Palotája tehát elindult felfelé, a látogatók száma és a bevétel folyamatosan emelkedett. Közben, 2001 márciusában elkészült az Öveges-terem, egy olyan előadóterem, amelyben érdekes fizikai kísérletek bemutatására volt (és van) lehetőség. *Härtlein Károly* vállalta az előadók betanítását, és maga is aktívan részt vett az Öveges-terem munkájában. Az ő lelkes munkájának eredménye, hogy ma már több nagyon tehetséges előadónk van, és több száz kísérletet tudunk bemutatni. Hamarosan ismertté vált az Öveges-terem is mint érdekesség, sokan jöttek ezekért a kísérletekért, valamint az előadásokat befejező lézershow miatt (ez sajnos a mai helyünkön, a Millenáris Parkban, a füstjelzők miatt egyelőre nem bemutatható). Az előadásokat később kiegészítettük félévi tantárgyi összefoglalókkal – szintén érdekes kísérletek formájában –, amelyekkel az iskoláknak az oktatási munkáját próbáltuk (és próbáljuk) segíteni. A kiállítást továbbra is évente újítottuk és újítjuk meg, mindig más központi témával.

Mindeközben kialakult egy további szolgáltatásunk is. Számos eszközből készítettünk duplikátumot, és lassan összeállt egy utazó eszközkészlet, amellyel rövidebb-hosszabb ideig külső helyszíneken is megjelenünk – akár kísérleti bemutatókkal kiegészítve. Évek óta állandó résztvevői vagyunk például a Matáv (ma már T-com) gyerekszigetnek, a Sziget-fesztiválnak és hasonlóknak. Egy külső partner megkeresése (Tropicarium) nyomán pedig kialakítottunk egy iskoláknak szóló szolgáltatást, amelynek keretében busszal és vezetővel visszük körbe az iskolai csoportokat – a programnak természetesen része a látogatás a Csodák Palotájában.

Voltak sikertelen próbálkozásaink is. Például megkíséreltünk esti előadásokat szervezni kiváló előadókkal (*Mérő László*, *Bányai Éva* – hipnózis, *Alföldi Ferenc* – szervátültetés, *Poltz Alain* és számos más előadó tartott érdekes esti előadásokat), de kiderült: a Váci útra csak nappal jönnek el a látogatók. Ezt a kezdeményezésünket hamarosan feladtuk.

Fokozatosan kialakuló ismertségünket és elismertségünket mutatja, hogy 2003-ban megkerestek minket a Magyar Nemzeti Banktól, hogy szeretnék, ha pályáznánk újonnan épülő látogatóközpontjuk kiállítás-rendezésére. Pályáztunk és megnyertük a rendezési munkát, ami nemcsak anyagilag volt kifizetődő, hanem – miután szakértők szerint is európai színvonalon készült el ez a kiállítás – szakmai tekintélyünket is növelte. Ennek eredményeképpen keresett meg minket például



a Paksi Atomerőmű, hogy működjünk közre az atomerőmű melletti *Látogatóközpont* korszerűsítésében (ez a munka, amelyet végül is teljes egészében ránk akarnak bízni, most folyik). Több más – nem csak magyarországi – helyről is kérték már közreműködésünket.

Időközben kiléptünk az európai szintre is. Először még 1999-ben kerestem meg egy német alapítvány (Förddersverein), hogy pályázzunk együtt az EU 5. keretprogramban. Ebből született együttműködés a brüsszeli Technopolis (akkor még csak a Stichtung Flanders létezett, az alapítvány, amely célul tűzte ki egy új science center létrehozását, ez lett a Technopolis), a dán Industrion és a német Förddersverein, valamint a Csodák Palotája között, amelynek célja az európai science centerek jó gyakorlatainak felmérése, összefoglalása volt. A három éves program végén ebből egy 150 oldalas tanulmány született az EU számára (*Pupils for Science and Technology* volt a címe ennek a projektnek, arra utalva, hogy a science centerek segíthetnek az ifjúság, a tanulók érdeklődését a természettudományos pálya felé fordítani).

A magunk számára ebből számos kapcsolat és nagyon sok tapasztalat született. Jelen pillanatban a EU 6. keretprogram keretében veszünk részt a *Hands on Brains* projektben, amelynek a koordinátora a Heureka, ők hívtak meg bennünket partnernek (összesen 11 partner résztvevő van), ennek célja a formális és informális oktatás eszközei összekapcsolási lehetőségeinek kidolgozása. Februárban bekapcsolódtunk a Wonders kezdeményezésbe, amely 33 európai science fesztivált kapcsol össze egy körbe, mindegyik rendezvény a legsikeresebb darabját elküldi a következő rendezvényre. A Palota itt egy 36 órán át tartó folyamatos kísérletbemutatóval vesz majd részt, és a legsikeresebb kísérleteket küldjük el Waterfordba, Írországba, amely a „körtánc” következő állomása. Hozzánk egy luxemburgi tudomány-színház előadása jön. Jelen pillanatban van szervezés alatt egy nagy kiállítás építését célzó EU-pályázat, amelynek a ötletét szintén a Heureka indította el. Résztvevői – megfogalmazásuk szerint – az EU leginkább számító science centerei, összesen hat, köztük (a Heureka vezetője, *Per Edwin Person* szavai szerint mi is ilyennek számítunk) a Csodák Palotája, valamint az ECSITE, az európai science centerek szövetsége.

2001-ben ismertem meg a Millenáris Parkot, akkor még csak a Fogadó épülete volt – majdnem – készen, és akkor határoztam el, hogy a Csodák Palotáját ide kellene költöztetni. Több évbe telt, mire ezt sikerült megvalósítani, számos tanulmányt, javaslatot készítettem, majd készítettünk *Kemény Tamással*, az IMFA igazgatójával, és küldtük el minden számba jöhető helyre. Végül is az Informatikai Minisztériumban figyeltek fel erre a tanulmányra, így került a projekt az IM-hez. 2005 szeptemberében nyílt meg az új helyen a Csodák Palotája kiállítása egy olyan konstrukcióban (közbeszerzési eljárás keretében), hogy az épületfenntartást és a működéshez szükséges megállapított összeget fizeti a Millenáris Parknak a – közben Jövő Háza Kht-re átkeresztelt – fenntartója, viszont a teljes jegybevétel az övé. A közbeszerzésben emellett elegendő pénzt kaptunk arra is, hogy teljesen felújítsuk eszközparkunkat, kialakítsuk az Öveges-termet, és vásároljunk néhány olyan eszközt is, amelyre korábban nem volt lehetőségünk, például egy ködkamrát és egy infravörös kamerát.

Az új helyen jelentősen megnőtt a látogatottságunk, hiszen erre a helyre nemcsak azért jönnek az emberek, hogy látogatást tegyenek a Csodák Palotájában – mint ahogyan ez a Váci úton volt –, mert itt olyan kultúrkörnyezetben helyezkedünk el, amelynek sokféle vonzereje van. A megnyitást követő első hétvégén 7000 látogató volt – amiben természetesen benne volt az újdonság varázsa is. De a magas látogatottság továbbra is megmaradt: hét közben az iskolai csoportok, hét végén a családok. Tapasztalatunk szerint elértük célunkat: a látogatók nem „kipipálják”, hogy itt voltak, hanem szeretnek visszatérni, hiszen itt mindig tartalmas szórakozásban van részük, felnőtteknek és gyerekeknek egyaránt.

Egyed László

A Csodák Palotája az első Magyarországon megalakult science center. Azóta több vidéki városban is nyílt hasonló célú intézmény (Szeged, Eger, Debrecen), speciális profilokkal. Arra kérjük ezek vezetőit, hogy adják meg a *Fizikai Szemlének* a centrumok anyagának rövid leírását, nyitvatartásuk idejét, hogy közhessük, hírtük elvihessük olvasóinkhoz.

Köszönettel:

Németh Judit főszerkesztő

Hargittai István: AZ ÖT VILÁGFORMÁLÓ MARSLAKÓ

Vince Kiadó, 2006, 398 oldal

A szerző *Hargittai István* akadémikus, a BME kémia- és az ELTE kutatóprofesszora, a szerkezeti kémia világszerte ismert kutatója, akinek tágabb érdeklődésébe tartozik a szimmetria és a 20. századi tudománytörténet. A szimmetriát 1969-ben a Texasi Egyetemen, Austinban magától *Wigner Jenőtől* tanulta. Mély benyomást tettek rá *Bruckner Győző* szerves kémiai előadásainak tudománytörténeti vonatkozásai. 1965-ben a moszkvai Lomonoszov Egyetem elvégzése után pár héttel már készítette is első interjút a Kossuth Rádió számára a szovjet Nobel-díjas *Nyikoláj Szemjonov*val. Azóta feleségével, *Hargittai Magdolna* akadémikus kémia-professzor-asszonnyal közösen fáradhatatlanul alkot ezen a területen is. Angol nyelvű interjúkönyv-sorozatuk, a *Candid Science* a hatodik köteténél tart. *Az öt világformáló marslakó* című könyv azért is tud újat adni a róluk szóló hatalmas irodalomhoz képest, mert a szerző felhasználja negyvenhárom saját interjú anyagát is.

Az eredeti, angol nyelvű kiadás, az I. Hargittai: *The Martians of Science: Five Physicists Who Changed the Twentieth Century*, az Oxford University Pressnél jelent meg New Yorkban, 2006-ban. A Vince Kiadó a kötet megjelenését támogatóknak köszönhetően ügyelhetett arra, hogy ez a kiadás is méltó külsőt kapott, igazi, keményborítós könyv lett.

Marx György marslakói külföldön sikereket elért magyar származású tudósok, írók, közgazdászok és befektetők. Hargittai István ebből a halmazból mindössze ötöt tekint marslakónak, azt az ötöt, akik szorosan összetartoztak, csoportot alkottak. Ha Hargittai István magfizikus, akkor lehet, hogy csak négy tudóst választ ki azért, hogy teljes legyen az analógia az alfareszecsékkel: kiszakadnak sok száz nukleontársuk közül, de az erős kötés miatt együtt maradnak. Szoborhasonlatok is felötlenek bennem. *Michelangelo* tudta leginkább többalakos műveit úgy megformálni, hogy érezzük, ők mind összetartoznak, egy tömbből faragtak. Gondoljunk csak az időskori Pietára. Azonban még messzebb is visszamehetünk az időben, megjelenhet lelki szemeink előtt a Laocoon-csoport. Ez azért is szerencsés párhuzam, mert láttatja azt is, ami csoporttá szervezi őket: közös harc az ellenséggel. *Kármán Tódor*, *Szilárd Leó*, *Wigner Jenő*, *Neumann János* és *Teller Ede* mind szoros kapcsolatban álltak a legmagasabb amerikai katonai és politikai vezetéssel: az ő alkalmazottaik voltak. Különleges, rendkívüli teljesítményt nyújtottak a katonai alkalmazásokban, az Amerikai Egyesült Államok védelmében. Közösen harcoltak előbb a náciizmus, majd a kommunizmus ellen. „Munkáik kiterjedtek az aerodinamikára és a kvantumme-

chanikára, a korszerű számítógépek megalkotására és a molekuláris biológiára, a nukleáris láncreakció megsejtésére és első megvalósítására, de még a játékelméltre is ... , Kármánnak fontos szerepe volt az amerikai légi-erő létrehozásában. Szilárd kezdeményezte az amerikai atombombaprogramot. Wigner döntően hozzájárult az első atomreaktorok megépítéséhez, és ő volt a világ első nukleáris mérnöke. Neumann részt vett a legkülönbözőbb védelmi feladatok megoldásában, és sikerrel alkalmazta a számítógépet a hidrogénbomba megtervezésében. Teller mint a hidrogénbomba atyja vált leginkább ismertté. Az ő kezdeményezésére hozták létre az Egyesült Államok második fegyverkutatói laboratóriumát, és aktívan közreműködött a csillagháborús tervek kidolgozásában is, melyek hivatalos neve: stratégiai védelmi kezdeményezés. Mind az öten az átlagos tudósnál aktívabbak voltak politikailag...”

Plutarkhosz Párhuzamos életrajzok című művében kimagasló görög és római személyiségek életművét mutatja be. Páronként külön-külön ír róluk, s csupán néhány oldalas a lezáró, tényleges összehasonlítás. Hargittai István másképpen dolgozik: csak a fejezeten belül különíti el hőseit, a tárgyalás fő sodrát a közös sors, az azonos célért vívott harc adja meg. A párhuzamba állítás következetes végig vitele adja ennek a műnek az egyediségét, a politizáló tárgyalás, a közvetlen, teljesen őszinte megközelítés pedig az igazi értékét.

A szerzőnek kiváló érzéke van a közös vonások megragadásában. Ezen a téren előtanulmányunk tekinthetjük az *Életeink – Egy tudományos kutató találkozás a 20. századdal* (Typotex, Budapest, 2003) című kötetét, amelyben az ő saját élete és 19 világhírű interjúalányának sorsa közt von párhuzamot. Páronkénti összehasonlítást ebben a műben is szerepeltet: a könyv végén *Enrico Fermi* és Szilárd Leó jellemét, munkamódszerét és eredményeit veti össze, valamint párhuzamot von a Manhattan-program két fő alakja, *Robert Oppenheimer* és Teller Ede közt.

A könyv első fejezete, a *Megérkezés és távozás* családi környezetüket, gyermekkorukat mutatja be. Részletesen ír iskoláikról, az 1867–1914-es időszakban bekövetkező társadalmi fellendülésről, haladásról, majd a trianoni békeszerződés következményeiről.

A második fejezet címe: *Fordulópont Németországban*. „A marslakók azért mentek Németországba, hogy egyetemre járjanak és magasabb tudományos fokozatot szerezzenek, majd idővel választott hivatásuknak megfelelő állást kapjanak, és megélhetést teremtsenek. Németország azonban ennél sokkal többet nyújtott számukra. Itt találkoztak a világ élvonalbeli tudományával,

és arra is hamarosan ráébredtek, hogy önmaguk is részesei lehetnek ennek az úttörő tudománynak. Ez fordulópontot jelentett mindannyiuk életében.”

A harmadik fejezet a marslakók második emigrációjáról szól, amely az 1930-as évek elején az Egyesült Államokba vitte őket. Ez a korszak addig tart, míg „új hazájukban – az 1930-as évek végén – bekapcsolódtak annak védelmébe.”

A negyedik fejezet címe: *Hadviselő marslakók*. Teller Ede szavait olvashatjuk a fejezetcím alatt. „Hajótörtek voltunk, de felvett bennünket egy mentőcsónak, amelyet azután készek voltunk minden erőnkkel megvédeni.” Elszántságuk, elkötelezettségük fő mozgató rugója az volt, hogy meg akarták menteni a szabad világot a náciizmustól. Ők Amerikában a náciizmus ellen harcoltak: megalkották az atombombát.

Az ötödik, záró főfejezet is új hazájuk védelméről szól, *az elrettentés hidegháborújáról*. Most a szovjet veszélytől kellett megóvni a szabad világot: kifejlesztették a hidrogénbombát. A fejezet alaphangulatát Kármán Tódor szavai adják meg: „... jobban megértik azt, amit mondani akarok, ha van egy husáng a kezemben. Nem azért, hogy használjam, de ha velem van, akkor szabadabban beszélhetek anélkül, hogy megzavarnának.”

Az *Ilyenek voltak* című 6. fejezet az öt világformáló marslakó emberi megnyilvánulásaiival foglalkozik: kapcsolatteremtés, elszántság, vallásosság, jellem. Hargittai

István bátran ír valódi vagy vélt hibákról is: elviselhetetlen modor, arrogancia, házasságon kívüli gyermek, hiúság, cinizmus, a munkatárs elárulása, hazugság, család. Azt is megtudhatjuk, hogyan ítélték meg saját tevékenységüket: a többi világformáló fizikus közé hova helyezték el magukat.

A tudós alapossága tükröződik a könyv szövegében és a mellékletekben is, ennek ellenére *Az öt világformáló marslakó* élvezetes olvasmány. Mondatai gördülékenyek, esetenként szenvedélyesen fogalmaz: „Utólag különféle becslések láttak napvilágot, amelyek szerint az első atombombák akár egy évvel hamarabb is elkészülhettek volna, ha az amerikai kormányzat és katonai vezetés már *Einstein* levelét követően felismerte volna a gyors cselekvés szükségességét. Ezeket a becsléseket fenntartással kell fogadni, de bele lehet remegni abba a gondolatba, hogyan alakulhatott volna a II. világháború menete és Kelet-Közép-Európa háború utáni sorsa, ha az atombombát már 1944 nyarán be lehetett volna vetni Németország ellen.”

Egészen részletes a *Köszönetek* oldala. Rendkívül pontos *Az illusztrációk forrása*. A *Jegyzetek* bősége talán már túlzás is. Az *Életrajzi adatok*nál tömören megtaláljuk az öt marslakó életének fő eseményeit. Ezután *történelmi adatok* következnek. A *Bibliográfia* 136 könyvet sorol fel. *Névmutató* és külön részletes, tíz oldalas *Tárgymutató* zárja a könyvet.

Kovács László

HÍREK – ESEMÉNYEK

HÍREK ITTHONRÓL

Újra várja látogatóit a TIT Uránia Bemutató Csillagvizsgáló

Január óta ismét megnyílt a kívül-belül megújult, felújított TIT Uránia Bemutató Csillagvizsgáló (1016 Budapest, Sánc u. 3/b). Derült idő esetén távcsöves bemutatás van hétfőn, csütörtökön és szombaton 19:00 és 22:00 óra között, csoportoknak előzetes egyeztetés után más időpontban is. Kérésre csillagászati témából

előadást, rendhagyó fizikaórát lehet szervezni. Belépési díj 500 Ft/fő. Az Uránia telefonszámai: +36 1 386-9233 és +36 1 209-9193, honlapja: www.urania-budapest.hu.

A legközelebbi nagy esemény a május 22-i (kedd) Szaturnusz-fedés lesz, valószínűleg rendkívüli bemutatóval.

HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

CoRoT Űrtávcső: út a csillagok belsejébe és új világok felé

2006. december 27-én sikeresen útjára indult Bajkonurból a CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transits; Konvekció, forgás és bolygóátvonulások) űrtávcső. A tisztán tudományos célt szolgáló űreszköz

a csillagok belsejét vizsgálja, csillagokban terjedő hanghullámok okozta felszíni fényváltozások megfigyelésével. Az eljárás a föld belsejét vizsgáló szeizmológiával rokon, ezért asztroszeizmológiának hívják.

Az űrtávcső pontos mérései lehetővé teszik, hogy a csillagok olyan elhalványodásait is kimutassa, amelyeket a Földnél kicsivel nagyobb, de ahhoz hasonló bolygók csillagkorong előtti átvonulása okoz. A CoRoT az első űrprogram, amivel távoli csillagok körül keringő ilyen új világok fedezhetők fel – az előzetes becslések szerint 10–40 ilyen felfedezés várható.

A legközelebbi csillag, a Nap esetében, és a legjobb műszerekkel is csak annak külső 400 km-es rétegébe láthatunk be közvetlenül (leszámítva a neutrínóknak a Nap magjából hozott információját). Az ESA SOHO űrtávcsőve már évek óta méri a Nap felszíni rezgéseit,

amivel a magzati ultrahangokhoz hasonlóan a Nap belsejébe is bepillantathatunk. A CoRoT az első európai űrtávcső, amely a SOHO elvéhez hasonlóan képes a csillagok belsejébe látni. A CoRoT tudományos eredményei lényeges ismereteket adnak ahhoz, hogy a Napot más csillagokkal összehasonlíthassuk, és betekinthesünk a Nap jövőjébe. A csillagok belsejének megismerése nagyon fontos ahhoz, hogy közelebb jussunk energiatermelésük és fejlődésük megértéséhez.

A Francia Nemzeti Űrügynökség (CNES) vezetésével nemzetközi összefogás keretében megvalósuló űrprogramban magyar csoport is részt vesz.

Tervek az aszteroidák elleni védekezésre

Nincs kétség afelől, hogy egy űrből származó szikladarab becsapódása jelentős károkat okozhat a Földön, azonban azt még nem döntötték el, mit is kellene az emberiségnek tennie e fenyegetés ellen.

Ezért gyűltek össze a tudósok 2007. március 5–8. között Washingtonban a *Bolygók elleni védelem* (Planetary Defense Conference) című konferencián. Az összejövetel célja egy „Fehér Könyv” megszerkesztése, amelyre az Egyesült Államok Kongresszusa adott megbízást. A konferencián részt vevő tudósok szerint legkevesebb egymilliárd dollárba kerül a becslések szerint mintegy húszszer, a Földre komoly

veszélyt jelentő aszteroida 90%-ának felderítése még 2020 előtt.

Azt is megvitatták, hogy az ütközési pályán lévő szikladarabokat milyen módszerekkel lehet eltéríteni. A lehetőségek között van olyan „űrvontató” járművek fellövése, amelyek a fenyegető objektumot új pályára állítják, vagy esetleg nukleáris robbantással próbálják a pályát módosítani – ez utóbbi emlékeztet az 1998-ban készült *Deep Impact* című sci-fi filmben használt stratégiára. A kidolgozott ajánlásokat a <http://www.aero.org/conferences/planetarydefense> címen fogják publikálni.

Vízajtású autó, de most komolyan?

A jó öreg H₂O-nak óriási előnye, hogy rengeteg hidrogént tartalmaz. Ha ezt a hidrogént alkalmas körülmények között fel lehetne szabadítani, akkor azzal sok akadály leküzdhető lenne, amely eddig megakadályozta hidrogénüzemű járművek létrehozását. A hidrogén előállítása hagyományos eljárásokkal igen drága, nem hatékony és környezetszennyező. Problémát jelent a hidrogén tárolása és szállítása is. A hidrogénüzemanyagot tároló tartály nehéz, mérete erősen korlátozza az autó teljesítményét és az utazás távolságát.

Tareq Abu-Hamed, a Minnesota Egyetem kutatója és társai az izraeli Rehovotban működő Weizmann Intézetben olyan rendszert terveztek, amely megkerüli ezeket a problémákat. Ha a víz elemi bórral reakcióba lép, hidrogén szabadul fel, amely a robbanómotorban elégethető, vagy egy üzemanyagcellában elektromos áramot hozhat létre. „A cél olyan ütemben előállítani a hidrogént, amelyet a kocsik motorja megkíván” – mondja Abu-Hamed. Bőr használatával a szállítás és a hidrogén tárolása feleslegessé válik. A működés mellékterméke bóroxid, amely a kocsiból eltávolítható és belőle a bőr visszanyerhető – ez pedig naperóművekkel működtetve teljesen emissziómentes eljárás. A kutatók becslése szerint a kocsinak 18 kilogramm bőrt és 45 liter vizet kell magával vinnie, hogy 5 kilogramm hidrogént fejlesszen, amelynek ugyanannyi az energiatar-

ma, mint a hagyományos 40 literes üzemanyagtankban lévő benzinnel. Egy izraeli társaság elkezdte a prototípus tervezését, és a Samsung cég hasonló elven alapuló robogó prototípusán dolgozik.

Abu-Hamed és társai nem az elsők, akik ilyen úton járnak. A Daimler Chrysler óriáscég már kifejlesztett egy Nátrium nevű járművet, amelyben a hidrogén nátrium és víz reakciójából jön létre. Tiszta víz helyett azonban nátrium-bórhidrát vizes oldatát használták, amely ruténium katalizátor jelenlétében hidrogént szabadít fel. A Nátrium autó csúcsebbsége 130 km/h volt, és egy tanknyi üzemanyaggal 500 kilométert lehetett vele megtenni. A cég azonban 2003-ban felhagyott a projekttel, mivel igen nehéz és költséges lett volna az ilyen kocsik gazdaságos működéséhez szükséges infrastruktúrát kiépíteni.

A szakértők meglehetősen szkeptikusak azt illetően, hogy belátható időn belül víz üzemanyagú autók tömegével fognak közlekedni. *Jim Skea*, a londoni UK Research Center kutatási igazgatója szerint nem valószínű, hogy a következő 5–10 évben ilyen autót látni fogunk. A Daimler Chrysler is inkább az irányban tesz erőfeszítéseket, hogy az autók üzemanyaga cseppfolyós hidrogén legyen, amelyet a töltőállomások könnyebben kezelhetnek.

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

Fém amely elpusztítja a szuper-baktériumokat

A baktériumok egyre veszélyesebbek lesznek, „hála” a hagyományos antibiotikumokkal szembeni rezisztencia egyre szélesebb körű kialakulásának. Új fegyverre van tehát szükség, és lehet hogy a tudósok meg is találták ezt a gallium nevű igen ritka fém alakjában. Egy új vizsgálat szerint a baktériumok könnyen összetéveszthetők ezt a fémet a táplálkozásukhoz nélkülözhetetlen vassal, és elpusztulnak, ha sokat vesznek fel belőle. Mivel a gallium már hatóságilag engedélyezett gyógyszer, a munka igen gyorsan piacra dobható mikrobaellenes gyógyszerek egy új csoportjához vezethet.

A gyógyszereknek ellenálló baktériumok között a *Pseudomonas aeruginosa* különösen kellemetlen. Az izomsorvadásban szenvedő páciensek között a halál leggyakoribb oka ez a baktériumfertőzés, amely a sebek lassú gyógyulását eredményezi, a testbe helyezett műszerek, például katéterek körül kialakuló elváltozásokat okoz, valamint a meggyengült immunrendszerű betegeket is megtámadja. A baktériumnak azonban van egy gyenge pontja, szüksége van vasra, hogy DNS-t tudjon szintetizálni, energiát termeljen, valamint védekezzen a mérgező oxidáció ellen.

Pradeep Singh, a Washington Egyetem, Seattle orvos-mikrobiológusa és társai ezt a tulajdonságot akarják kihasználni hogy ezt az igen ellenálló baktériumot

megfékezzék. A kutatócsoport az ezüstös gallium fém-mel próbálkozott, amely ionjainak mérete és töltésállapota igen hasonló a vaséhoz, de annak az életfunkcióját nem képes ellátni. Ha egy Petri-csészében *Pseudomonas aeruginosa* kolóniához kismennyiségű galliumot adtak, a baktériumszaporulat három nagyságrenddel csökkent. Az egereknél hasonló jelenséget figyeltek meg: igen kismennyiségű gallium naponta történő belelegzése jelentősen csökkentette a légúti fertőzések esélyét. Singh felhívta a figyelmet arra, hogy intravénásan adagolt gallium károsíthatja a vesét, ezért túl korai még a biztonságos emberi dózisiról beszélni. A fém ellen az antibiotikumokkal ellentétben nem alakul ki rezisztencia, mivel hatásmechanizmusuk igen széleskörű és változatos, ezért igen vonzó alternatívát jelent az antibiotikumokkal szemben. A kutatócsoport eredményeit a *Journal of Clinical Investigation* című szakfolyóiratban publikálta. Daniel Hassett, az University of Cincinnati, College of Medicine, biológusa szerint Singh és kollégái fontos felfedezést tettek: „Rendkívül izgalmas munka egy új antibakteriális gyógyszer kifejlesztésében.” A galliumot már használják a vér rák okozta magas kalciumszintjének kezelésére, ezért ez a körülmény meggyorsíthatja az új szer klinikai vizsgálatának lefolytatását.

(<http://sciencenow.sciencemag.org>)

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

MITŐL SZÍNES AZ ÉLŐVILÁG?

Általában hajlamosak vagyunk arra, hogy ami mindennapi tapasztalat, azt egyszerűen természetes és magától értetődő dolognak tartjuk. Így van ez a színekkel is.

„A szín a természet mosolya, egy csöppnyi igazság” – mondta egy angol bölcs. És milyen igaza volt! Menynyivel kisebb élményt nyújt például a fekete-fehér televízió és film, mint a színes. Színek nélkül kiüresedne világunk. Talán fel sem tűnik, de *sárga* színnel ragyog a Nap, *kék* az ég és a tengerek színe, *vörös* vér kering az ereinkben, *zöld* színben pompáznak a lombok, hogy csak néhányat említsünk. Az egyes színekkel különböző érzelmi hatást is kiválthatunk. Más színű fényrel világítják meg az iskolai tantermet, mással a bárókat, a húsos pultokat az ételkészítésekben. Tárgyaink a megvilágító színtől függően más és más színűnek tűnnek, s bennünk is különböző hatásokat váltanak ki.

A történelem folyamán a színeknek szimbolikus jelentése is kialakult. Egy időben, Kínában sárga ruhát csak a császár hordhatott, mert a sárga a legmélyebb bölcsesség, a legteltesebb megvilágosodás jelképe volt. A gyászoló kínaiak fehérbe öltöztek, jelezve, hogy az elhunytat a tisztaság és a fény országába kísérik.

Mást jelentenek a színek a festőknek és a fizikusoknak, az irodalmároknak, a kémikusoknak, más a pszichológusoknak és az ipari formatervezőknek. A *színtan* a fizika és az orvosi szakkönyvek önálló fejezetévé vált. De művészek is könyveket töltenek meg a színekkel kapcsolatos ismereteikkel.

Mi a magyarázata annak, hogy az égboltot kéknek, a fűvet zöldnek, a paradicsomot pirosnak, a grafitot feketének látjuk? Mitől színesek a lepkék, a madarak? Hogy ilyen kérdésekre válaszolhassunk, segítségül kell hívnunk a fizikát, a kémiát, a biológiát.

A színek

A szín mint jelenség csak részben függ fizikai-kémiai folyamatoktól. Függ a szem működésétől, s attól is, hogy mi megy végbe az agyban. A fény érzékelése összetett, *fotokémiai*, *idegi* és *pszichológiai* folyamatok eredménye. Az egészséges emberi szem színérzékelése rendkívül érzékeny, igen sokféle színárnyalatot képes megkülönböztetni.

A tudósokat már a régmúlt időkből érdekli a különböző színek eredete. Annak ellenére, hogy a mindennapi életből és tudományos kísérletekből is rendkívül sok tapasztalat gyűlt össze a színekről, az eredetükre vonatkozó kielégítő magyarázatra viszonylag sokáig, a XVII. századig kellett várni. *Newton* (1666) előtt a színek keletkezéséről igen sok, egymásnak ellentmondó magyarázat forgott közkézen. Igaz, már akkor észrevették, hogy a testek színe függ a megvilágítástól – ugyanaz a test a nap különböző szakában más színűnek látszott –, de a testek színét a testek tulajdonságának vélték.

A szivárvány jelenségét régről ismerik, sőt rögzítették kialakulásának körülményeit is. *Descartes* (1596–1650) szökökút szétporlasztott vízcseppein megfigyelt már mesterséges szivárványt is, sőt ő maga, a vízcseppet vízzel telt gömb alakú üvegedénnyel modellezve, a szivárvány színeit kísérletileg is tanulmányozta. Ennek ellenére a színek keletkezése, azok sorrendjének oka még akkor sem volt világos.

Newton távcső készítése közben figyelmes lett a lencsék karimáján vetítéskor megfigyelhető elszíneződésre, ami érdeklődését a színek tanulmányozásának irányába fordította. Besötétített szobába vékony nyíláson beszűrődő fény útjába prizmat helyezett, s a szemközti falon színes csíkok tűntek fel, elsőként állított elő tehát színeképet. A *spektrum* elnevezés is tőle származik. A színeképet azt is bizonyította, hogy a *fehér fény színes fény keveréke*. Megállapította, hogy a prizma a különböző színű fénysugarakat különböző módon töri meg (a jelenséget *diszperzió*nak nevezzük), s ha azokat lencsével újra összegyűjtjük, ismét fehér fényt kapunk. A spektrum színei tovább már nem bonthatók.

Newton alapvető kísérlete két fontos felfedezést tartalmazott:

1) adott közegben a közeg törésmutatója a különböző színű fénysugarakra más és más,

2) a fehér fény egyszerű színekből összetett fény.

A körülöttünk lévő dolgokat vagy azért látjuk, mert maguk világítanak, vagy azért, mert megvilágítottuk őket. A testek a rájuk eső fény egy részét *visszaverik* (*reflexió*), a többit *átengedik* (*transzmisszió*) vagy *elnyelik* (*abszorpció*). E három folyamat egymáshoz viszonyított mértéke határozza meg az önállóan nem világító testek színét. A *fekete* színű test például a fény hullámhosszától függetlenül minden fényt elnyel, az áttetsző *fehér* test pedig szinte mindent visszaver. Ha a fehér fényből valamilyen oknál fogva hiányzik az egyik összetevő, akkor a megvilágított test a hiányzó szín *kiegészítő* (*komplementer*) színében látszik.

Hogyan állíthatunk elő színeket?

A fény és anyag kölcsönhatásakor az anyagnak adott energia függ a fény színétől, a frekvenciájától. Ha atom vagy molekula nyel el fénykvantumot, megváltozik a magok és elektronok kölcsönös elrendeződése, megnövekszik a rendszer energiája. Abból a tényből, hogy a molekula akármilyen energiát nem vehet fel, arra következtethetünk, hogy a magok, és

az elektronok rendszere nem lehet tetszőleges állapotban. Energiájuk csak meghatározott adagokban, *kvantumosan* változhat. A rendszernek az állapotváltozáshoz pontosan meghatározott energiára van szüksége, s ha ez nem túl nagy energiaadag, akkor elnyelheti a fényből is. Ha megtörténik az elnyelés, akkor az atom (vagy molekula) „gerjesztett” állapotba kerül.

Egy egyszerű mechanikai rendszer, a *rezgő húr* is hasonlóan viselkedik. A kifeszített, mindkét végén rögzített húron állandósult hullámok, *állóhullámok* alakulnak ki. A rezgő húrnak is sokféle állandósult állapota lehet, de nem akármilyen. A rezgő húr is „kvantumos”. A „sokféle, de nem akármilyen állapot” lehetősége miatt a rezgő húr az atomok és a molekulák, vagyis az atommagokból és elektronokból álló rendszerek kitűnő modellje.

Ha gondolatban egy elektront egy *L* hosszúságú, minden erőhatástól mentes „egydimenziós dobozba” zárunk, akkor az elektron mozgásához egy vonalszakasz áll rendelkezésre. Az elektron az egydimenziós dobozban szabad, rá semmiféle vonzó vagy taszítóerő nem hat, helyzeti energiája nincsen. Változhat viszont a mozgási energiája. Az elektron energiájának az elektron úgynevezett de Broglie-hullámhosszával való kapcsolata lehetőséget ad arra, hogy összekapcsoljuk az elektron *lehetséges állapotait* a *húrmodell*el. Ahogy az *L* hosszúságú húron csak olyan mozgásállapotok alakulhatnak ki, amelyekre igaz, hogy a hullámhossz felének egész számú többszöröse adja a húr *L* hosszát, úgy az *L* hosszúságú vonaldarabra beszorított elektron mozgási energiája is meghatározott adagokban változhat. Az energiaadag nagysága fordítottan arányos a doboz *L* hosszával. Ez azt jelenti, hogy ha az elektron mozgásához *kellően nagy térrész* áll rendelkezésre, akkor energiáját *kis adagokban* változtathatja. Az ilyen „rendszer” már a *látható fény* viszonylag kis energiájú fotonjaival is gerjeszthető, s ha azokat elnyeli, akkor a fehér fény kiegészítő színében látszik. Ez a modell sikeresen használható festékek „színezésének” megértéséhez.

Festékek a növény- és állatvilágban

Az élő természet rengeteg színárnyalatát mindössze háromféle vegyülettípus kialakulása, kölcsönhatása és bomlása okozza. Ezek a *karotinoidok*, *porfirinek* és *flavonoidok*. A színek eredetének elemzéséhez ezért segítségül kell hívnunk a kémiát. A teljesség igénye nélkül mutatunk néhány példát a környezetünkben ismert élővilágból minden vegyülettípusra.

A karotinoidok okozzák például az árvácska, a pitypang virágjának, a sárgarigó és a kanári tollának, a homár páncéljának a színét. (A hátsó belső borítón néhány képpel illusztráljuk az élő természet sokszínűségét az írásban szereplő növények, állatok segítségével.) A sárgarépa festékanyaga a *karotin* mellett a vegyületcsoport egyik legismertebb tagja a *likopin*. Likopin legnagyobb mennyiségben a paradicsomban

van, de kevesebb található a csipkebogyóban, a görögdióban és más gyümölcsökben is. Ez a vegyület felelős a piros színért.

Valamennyi porfirin jellegű festékanyag alapját a *porfin* nevű gyűrűs vegyület képezi. A porfirinek két legfontosabb képviselője a *hem* és a *klorofill*. A hem a vér oxigénszállító molekulája vörös festékanyagának, a *hemoglobinnak* a nem fehérjetermészetű része. A gyűrű középpontjában egy darab két vegyértékű vasatom van, amely a porfinváz két hidrogénatomját helyettesíti, és a gyűrűkhöz különböző oldalláncokkal kapcsolódik. A növények zöld színéért a klorofill a felelős, ebben a molekulában a porfingyűrű közepén magnéziumatom található.

A legtöbb virág és gyümölcs a színét a flavonoidoknak köszönheti. A *flavon* sárgára színezi, a növények vörös, kék, bordó és ibolya színét pedig az *antociánok* okozzák. Az antociánok olyan vegyületek, amelyek egy színes flavonoid részből és egy színtelen cukorrészből állnak. Az antociánok a közeg pH-jától függően változtatják szerkezetüket és ennélfogva a színüket is. Ugyanaz a vegyület, amely savas közegben (pH = 3) piros, lúgos közeg (pH = 11) esetén kék, adja a vörös rózsza és a kék búzavirág színét. Csodálkozunk azon, ha a tavaly még kék jácint a következő évben vörös színű virágot hoz. A magyarázat egyszerű. Ha a hangyák véletlenül tartósan a jácint hagymája körül vernek tanyát, akkor a hangyasavval savanyított talaj a színekért felelős molekulában szerkezeti változást idézhet elő. A megváltozott szerkezetű molekulák a növény szirmára eső fehér fényből már másik összetevőt nyelnek el, így más kiegészítő szín mutatkozik. A kertészek ilyen módon a legváltozatosabb színű virágokat állíthatják elő, például megfelelő sókat a talajba keverve, mélyen beavatkozhatnak a természet munkájába.

Vajon mi a közös e szerkezetekben?

Ismeretes, hogy a molekulákban az elektronok σ - és π -kötő, lazító és nem-kötő molekulapályákon tartózkodnak. Mindhárom említett szerves molekulatípusban a molekulában úgynevezett konjugált kettőskötésekkel szemléltethető elektronrendezés található. A molekula lehet lineáris (karotin), de a szénatomok záródhatnak gyűrűvé is (klorofill). Vagy együtt tartalmazhatnak hosszabb lineáris szakaszokat és a láncvégeken záródó gyűrűs elemeket is. Az ilyen molekulákban vannak olyan elektronok (delokalizált elektronok), amelyek mozgása a teljes molekulaméretre kiterjedhet. A molekula hosszában mozgó „szabad” elektronok állapota, és a két végén rögzített L hosszúságú húr mérete és állapotai között párhuzamot vonhatunk. A fentiekben már említett okok miatt a hosszabb molekulában az elektronok energiája kisebb adagokban változhat, a molekula kisebb frekvenciájú fény elnyelésére képes. Például a karotinoidok családjába tartozó, fokozatosan növekvő számú szénatomot tartalmazó molekulák színe a sárgától a vörös felé változik. A sárgarépa színe, a karotin a kék színű fény, a paradicsom vörös színe, a likopin pedig a zöldessárga színű fény elnyelésével alakul ki. A

piros paprika színéért felelős *kapszorubin* molekulában is olyan hosszúságú konjugált lánc található, amely a zöld fény elnyelését teszi lehetővé, a paprikát a zöld szín kiegészítő színében, pirosnak látjuk.

A látás és a színérzet

A karotinhoz nagyon hasonló szerkezetű molekulát, a *retinált* (hosszúsága fele a karotinének) használja szemünk a fény felfogására, melyhez a szem a hasonló szerkezetű A-vitaminből jut hozzá. (Ezért okoz az A-vitamin hiánya szürkületi vakságot). A szemünkbe érkező fénysugár a különböző színérzékenyséű csapokban (3-féle csap) eltérő erősségű elektromos jelet, idegáramot idéz elő. Az idegáram-erőségek aránya minden sugárzás esetén más és más, s az agyban minden egyes arány esetén más színérzet alakul ki. Ha a fényinger egyforma erősen hat mind a háromféle csapra, akkor fehér fényt észlelünk. A vörös fény a vörösre érzékeny csapokban erősebb idegáramot kelt, így vörös színérzet keletkezik. Ha a fényinger egyforma erősen hat a vörösre és a zöldre érzékeny csapokra, akkor sárga színt látunk. Ily módon valamennyi szín a *vörös*, a *zöld* és a *kék* keverésével áll elő. Ezért nevezzük az egészséges színlátást háromszínűnek, *trikromatikusnak*, és ezért kell háromszínű (RGB) jel a színes megjelenítők működtetéséhez.

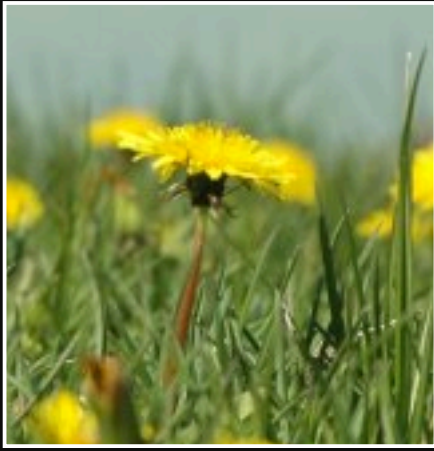
Szerkezeti színek az élővilágban

A színek a biológiai rendszerekben, a madarak és rovarok világában gyakran festékszemszékben, *pigmentek*ben keletkeznek, a „kémiai színezés”-nél megismert hullámhosszfüggő fényelnyelés útján. Bizonyos esetekben azonban a színek keletkezése a fény egy meghatározott *szerkezet*en történő szelektív szóródásának, interferenciájának, illetve diffrakciójának következménye, ezért ezeket *szerkezeti* vagy *struktúraszínek*nek nevezzük.

A természetben gyakran a különböző színezési lehetőségek kombinálása figyelhető meg. A továbbiakban néhány példát mutatunk a szerkezeti színeket „viselő” élőlényekre.

A *fényszórás* játszik szerepet a kék színnek a kialakításában a kékszajkó, a kék szem (pl. a szíami macskáé), a kékszilva, a kökény esetén. A *fényinterferencia* felelős azoknak a színeknek a kialakításáért, amelyek változnak a megfigyelés irányának (szögének) változtatásával, s fémes jellegűek. E színeket *irizáló színek*nek hívjuk. A kagylóhéjak szivárvány játéka, a kolibri ragyogó színei, a pávatoll színének változása, és néhány Dél-Amerikában élő lepkefaj (*Morpho*-család) metálik színei a legjobb példák e megoldásra. A *fényelhajlás* a CD-lemezen élénk spektrum megjelenését eredményezi, hasonlóan alakul az indigókígyó színe is bőre finomszerkezetén, amely kétdimenziós reflexiós diffrakciós rácsként működik.

Rajkovits Zsuzsanna
ELTE Anyagfizikai Tanszék



LASER 2007

World of **PHOTONICS**

18th INTERNATIONAL TRADE FAIR AND CONGRESS FOR OPTICAL
TECHNOLOGIES—COMPONENTS, SYSTEMS AND APPLICATIONS

LIGHT AT WORK

EGY VILÁGVÁSÁR NEM A MÉRCÉHEZ IGAZODIK, Ő MAGA A MÉRCE! Csak Münchenben láthatja a különböző ágazatok számára kidolgozott innovatív optikai technológiák közvetlen ipari alkalmazását, röviden: „**light at work**”.

Ezért vált a **LASER. World of Photonics** a piacvezetők, döntéshozók és alkalmazók legfontosabb üzleti és networking színhelyévé. Tekintse meg Ön is!

Már most használja ki az online-regisztráció előnyeit: **www.world-of-photonics.net**

Információ: Promo Kft., 1015 Budapest, Széna tér 1/A.
Telefon (01) 224-7764, hunmunch@elender.hu



NEW MUNICH
TRADE FAIR CENTRE
18–21 JUNE 2007

www.world-of-photonics.net