

Természet Világa

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY

146. ÉVF.

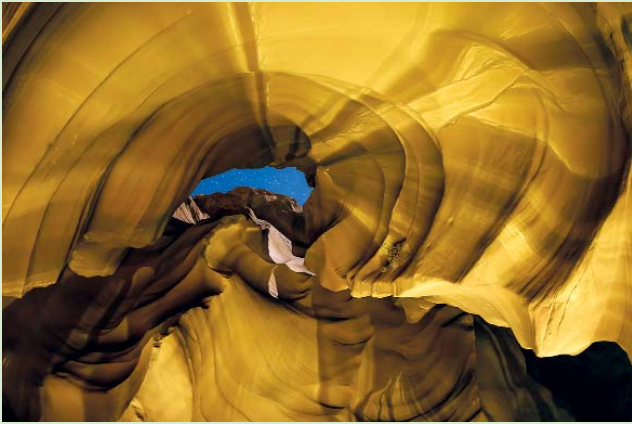
2015. II. KÜLÖNSZÁM ÁRA: 980 FT

2015 A Fény Nemzetközi Éve



Fényes képek

Válogatás természetfotósok képeiből



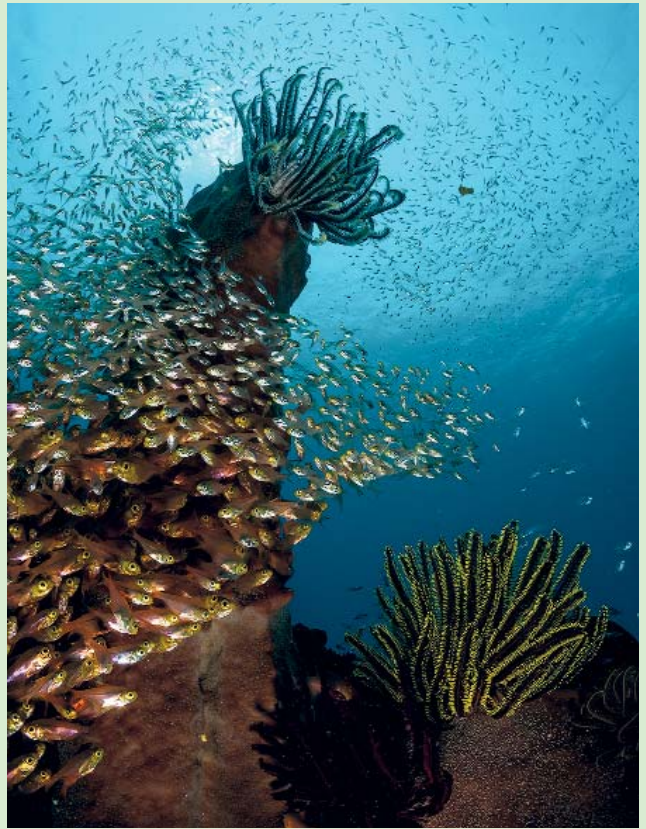
Laki Zoltán: Csigaház



Gódor Mikós: Titkos szerelem



Somodi Ferenc: Landolás



Násfayné Kőházi Mária: Keringő



Sándor-Tóth Zsuzsanna: Erdő mélyén



Varga István: Meseország

Természet Világa



A TUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTŐ
TÁRSULAT FOLYÓIRATA

Megindította 1869-ben

SZILY KÁLMÁN

KIRÁLYI MAGYAR

TERMÉSZETTUDOMÁNYI

TÁRSULAT

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY
146. ÉVFOLYAMA

2015/II. különszám

2015 – A Fény Éve



Magyar Örökség-díjas
és Millenniumi-díjas folyóirat

Megjelenik
a Magyar Tudományos Akadémia
és a Szellemi Tulajdon Nemzeti



Hivatala

támogatásával



Szellemi Tulajdon
Nemzeti Hivatala

Főszerkesztő:
STAAR GYULA

Szerkesztőség:
1088 Budapest, Bródy Sándor u. 16.
Telefon: 327-8962, fax: 327-8969
Levélcím: 1444 Budapest 8., Pf. 256
E-mail cím: termvil@mail.datanet.hu
Internetcímünk: www.termeszetvilaga.hu

Felelős kiadó:
PIRÓTH ESZTER
a TIT Szövetségi Iroda igazgatója

Kiadja
a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.
Telefon: 327-8900
Hirdetésfelvétel a szerkesztőségben

Nyomtatás:
Topbalaton Kft.

Felelős vezető:
Lasztovicza Gábor
ügyvezető igazgató

INDEX 25 807
HU ISSN 0040-3717

Korábbi számok megrendelhetők:
Tudományos Ismeretterjesztő Társulat
1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16.
Telefon: 483-2546, fax: 338-4411
e-mail: titlap@telc.hu

Előfizethető:
Magyar Posta Zrt. Hírlap üzletág
06-80-444-444
hirlapelofizetes@posta.hu

Előfizetésben terjeszti: Magyar Posta Zrt.
Arusításban megvásárolható a Lapker Zrt.
árusítóhelyein

TARTALOM

„Aki a múltját nem becsüli, a jövőt sem érdemli meg”. Kroó Norbert akadémikussal, a Fény Éve magyarországi Programbizottság elnökével beszélget Both Előd	2
Both Előd : Évfordulók	6
Abonyi Iván : A fény Nobel-díjasai. I. A fénysugárzás modern elméletének kialakulása a fizikai Nobel-díjak tükrében	7
Radnai Gyula : A fény Nobel-díjasai. II. Fénylő évek, nevek, események az orvosi, fizikai, kémiai Nobel-díjak történetében	10
Pécz Béla : Fiat Lux. Legyen világosság! – mondta a Nobel-díj Bizottság	18
Patkós András : Létezhet-e anyag fény nélkül? Kutatás a fénytelen anyag után	21
Solt György : Az első fény	26
Kiss L. László : A számokká alakított fény. Digitális égboltfelmérések	30
Kolláth Zoltán : Történetek a fényszennyezésről	35
Farkas Győző : Hogyan készül és mire jó az ultrarövid fényimpulzus?	40
<i>Különszámunk szerzői</i>	44
Fényreszabott méter. Beszélgetés Bay Zoltánnal (Staar Gyula interjúja)	45
Schiller Róbert : Napfényből hidrogén	49
Kajtar Márton : Miért piros a paprika? (Tomasz Jenő előszavával)	52
Lente Gábor : „... és lőn világosság”. Fényt kibocsátó kémiai reakciók a világító rudaktól a szentjánosbogarakig	60
Horváth Gábor : A fénysarkítás dicsérete. Látás poláros fénnel	64
Szabad János : Belső óra, napi ritmus	72
Kozma-Bognár László : A növényi cirkadián óra beállítása fénnel	78
Andrásfalvy Bertalan : Nanokristályok szinkavalkádja. Világító pipettahegy	82
Csáji Attila : A technika és a tudomány új eredményeit merítsük meg az emberi pszichikum mélységeiben. A fényművészetről a Fény Évében	85
Bacsárdi László – Friedl Zita : Versenyfutás az árnyékkal, avagy az 1999. augusztus 11-ei napfogyatkozás hiteles története	89
Lang Ágota : Idővonalaink	91

Címképünk: A Fény Nemzetközi Éve – 2015

Borítólapunk második oldalán: *Fényes képek. Válogatás természetfotósok képeiből*

Borítólapunk harmadik oldalán: *Az MTA Fény Éve fotópályázatának képei*

Borítólapunk negyedik oldalán: *A Természet Világa különszámai*

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Elnök: VIZI E. SZILVESZTER

Tagok:

ABONYI IVÁN, BACSÁRDI LÁSZLÓ, BAUER GYÖZŐ,
BENCZE GYULA, BOTH ELŐD, CZELNAI RUDOLF, CSABA GYÖRGY,
CSÁSZÁR ÁKOS, DÜRR JÁNOS, GÁBOS ZOLTÁN, HORVÁTH GÁBOR,
KECSKEMÉTI TIBOR, KORDOS LÁSZLÓ, LOVÁSZ LÁSZLÓ,
NYIKOS LAJOS, PAP LÁSZLÓ, PATKÓS ANDRÁS, PINTÉR TEODOR PÉTER,
RESZLER ÁKOS, SCHILLER RÓBERT, CHARLES SIMONYI,
SZATHMÁRY EÖRS, SZERÉNYI GÁBOR, VIDA GÁBOR,
WESZELY TIBOR

Főszerkesztő:

STAAR GYULA

Szerkesztők: KAPITÁNY KATALIN, NÉMETH GÉZA

Tervezőszerkesztő:

HORVÁTH IMRE

Titkárságvezető:

HORVÁTH KRISZTINA

„Aki a múltját nem becsüli, a jövőt sem érdemli meg”

Beszélgetés Kroó Norbert akadémikussal, a Fény Éve
magyarországi Programbizottság elnökével

– Professzor Úr! Az ENSZ 2013-ban a Fény Nemzetközi Événél nyilvánította 2015-öt. Az esemény alkalmából a Természet Világa – az MTA támogatásával – különszámot ad ki, amelyben kiváló hazai szakemberek mutatják be a téma legkülönbözőbb aspektusait. A Fény Éve hazai eseményeit az Ön vezetésével működő Programbizottság irányítja, ezért kértem ezt a beszélgetést. De kezdjük az elején! Az ENSZ és az UNESCO felé a kezdeményezést az Európai Fizikai Társulat indította, amelynek Ön korábban alelnöke, majd elnöke is volt, jelenleg pedig 15 tiszteleti tagjának egyike. Honnan eredt a Fény Éve ötlete, és mit vártak, várnak a kezdeményezéstől?

– Az előkészítő beszélgetéseken én is részt vettem az Európai Fizikai Társulatban (EPS), ahol azt az álláspontot képviseltem, hogy a Fény Évét ürügynek, eszköznek kell tekintenünk ahhoz, hogy a széles közönség, elsősorban a fiatalok figyelmét ráirányítsuk a tudományra, azon belül elsősorban a fizikára. A kezdeményezés egyik előzményét, az ugyancsak az EPS által néhány évvel ezelőtt szervezett Fénystaféta jelentette, amikor egy fénynyaláb körbement a Föld körül. Úgy gondoltuk, hogy ennek logikus folytatása lehet a Fény Éve. A múltra vonatkozóan van már hasonló kezdeményezés, például a Múzeumok Éjszakája, mi viszont a jövőt, a természettudományt állítottuk a középpontba. A kezdeményezést erőteljesen támogatták a franciák, ahol a fény kultúrájának nagy hagyományai vannak, az EPS akkor elnöke, a Franciaországban dolgozó, új-zélandi születésű John Michael Dudley pedig a kezdeményezés élére állt. Sikertől összeszedni azokat a kerek éveket (lásd az interjút követő írásunkat), amelyek segítettek meggyőzni az UNESCO-n keresztül az ENSZ-et arról, milyen jelentős mértékben megváltoztatta az emberiség életét a fény kutatása.

– A Fény Éve eseményeit nemzetközi programbizottság, illetve a részt vevő 93 ország és három szervezet nemzeti koordinátorai fogják össze. Milyen a munkamegosztás, mennyire kaptak szabad kezét a nemzeti programbizottságok?

– A nemzeti koordinátorok teljes mértékben szabad kezűt kaptak, önállóan döntenek a programokról. Az alaphangot a január 19–20-án Párizsban tartott megnyitó ünnepség adta meg, ahová több Nobel-díjas tudós mellett meghívtak például egy püspököt, hiszen ennek a témának az egyházi vonatkozásai is jelentősek. Összességében elmondhatom, hogy megfelelően képviselve volt mind a négy terület, amely köré a Fény Éve eszmeiségét csoportosítottuk: a tudomány, a technológia, a természet és a kultúra. A program-sorozat nemzetközi honlapján folyamatosan hírt adnak a legfontosabb eseményekről, emellett ezekről a nemzeti koordinátorokat közvetlenül is tájékoztatják. Pontosan tudjuk tehát, mikor mi történik az egyes résztvevő országokban, milyen események várhatóak, így ötleteket is meríthetünk egymás munkájából.

– Az eseménysorozat lezárásaként értékelő jelentés készül az ENSZ Közgyűlése számára. Körvonalazódik-e már most ennek a tartalma, lehet-e már tudni, mi lesz a fő üzenete?

– Hosszabb jelentés készül, amelyben összefoglaljuk az ese-



ményeket, összesített felsorolást szeretnénk adni, milyen rendezvények voltak. Franciaországban például már korábban ezer eseményről számoltak be.

– A Fény Éve hazai koordinációját a Magyar Tudományos Akadémia, illetve azon belül az Ön által vezetett Programbizottság végzi. Szakmai életútja egyértelműen predesztinálja erre a szerepre, hiszen 1971-től csaknem három évtizeden át irányította a KFKI-ban az optikai, lézerfizikai kutatásokat. Kérem, említsen néhányat a saját tudományos eredményei közül, amelyek legjobban kapcsolódnak a Fény Évéhez!

– A lézer-anyag kölcsönhatás volt az első ilyen terület, a szilárdtest-lézerek felhasználása volt a második, de nekem a legnagyobb örömet a plazmonika jelentette. Amerikában minden évben tartanak egy konferenciát „A kvantumelektronika fizikája” címmel. A 2000-es évek elején a 400–500 fős konferencián az egyetlen voltam, aki plazmonikáról tartott előadást. Mára a plazmonika önálló diszciplínává vált. Idén januárban ugyanezen a konferencián az előadások negyede a plazmonikához kapcsolódott. Ennek a follow-up konferenciáját idén az én tiszteletemre rendezték, és kitüntetésre is felterjesztettek.

A plazmonikának már nagyon fontos gyakorlati alkalmazásai is vannak. Erre csak egyetlen példát említek. A felületi plazmonok kis, nanoméretű fémgömböcskéken lokalizálódnak, ott óriási tér jön létre. Amerikában kidolgoztak egy olyan technológiát, hogy

ezeket a fémgömböcskéket a véráramba injektálják, ahol azok a több vért felhasználó rákos szövetekben feldúsulnak. A gömbök méretét úgy állítják be, hogy bizonyos hullámhosszú infravörös sugárzásra rezonáljanak. Az infravörös sugárzás áthatol a szöveteken, így a gömböket kívülről meg lehet világítani. Ezért a rákos szövetben feldúsul az elektromágneses energia, elpusztulnak a rákos sejtek. Amerikában ezt a módszert már a klinikai gyakorlatban is alkalmazzák. Azt szeretném, ha ez nálunk is elterjedne.

Emellett büszke vagyok arra, hogy sikerült szobahőmérsékleten szupravezetést előállítanunk, méghozzá aranyban. Az első lépés véletlen volt, de sikerült. A lapcentrált köbös kristályok nagyon merevek, ezért az elektronpárok nem tudnak mozogni közöttük. Az elektronpárokat viszont fononok, vagyis hanghullámok kötik össze, ezt a kötést az új típusú fénnel, tehát plazmonokkal hozom létre. A fononok energiája millielektronvolt nagyságrendű, az én plazmonjaim pedig 1,5 eV-osak, vagyis nagyon erős a kötés. Ezt egy femtoszekundumos lézerrel hozom létre, 80 GW/cm² lézerintenzitással. Ez a mostani kutatási területem.

– Térjünk vissza a Fény Évéhez, de immár a hazai eseményekhez. Melyek a Programbizottsággal együttműködő szervezetek, intézmények? Mi a szerepe az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, amelynek Ön a tiszteletbeli elnöke?

– Engem is megdöbbentett, milyen széles körben, mennyire pozitív visszhangot váltott ki a kezdeményezés, nemcsak a nemzetközi porondon, hanem itthon is. Indulásként első dolgom volt, hogy megkeressem a lehetséges hazai támogatókat. Első utam az



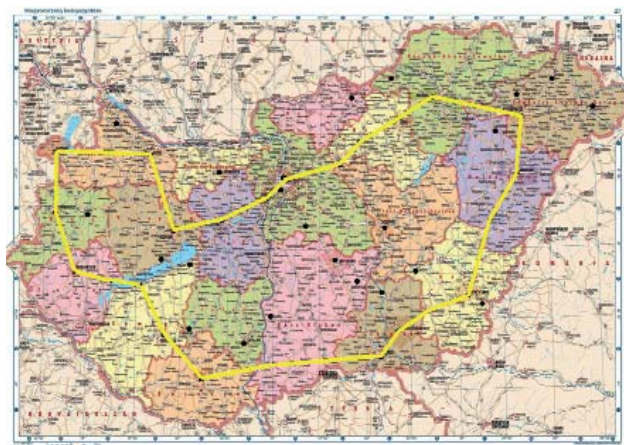
Március 20-án, a Széchenyi István téren, az MTA Székháza előtt közel kétezer érdeklődő figyelte meg távcsöveken keresztül a részleges napfogyatkozást (Forrás: fenyveve.mta.hu, Szigeti Tamás felvétele)

MTA-hoz vezetett, ahol Lovász László elnök úr minden módon támogatta a kezdeményezést; az MTA az akció élére állt. Természetesen azonnal mellénk állt az UNESCO Magyar Nemzeti Bizottsága, ahol Réthelyi Miklós professzor úr, a Bizottság elnöke személyesen kapcsolódott be a munkába. Segítségre sietett a Páliskás József akadémikus vezetésével működő Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal is. Támogatónak sikerült megnyerni két szakmai egyesületet is, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat mellett a Magyar Kémikusok Egyesületét is. Mindkét társaság sok rendezvényt szervez. Különösen nagy siker volt *A fizika mindenkié* program, amely 45 település több mint 50 intézményében zajlott. Mivel a programok nagy része a diákoknak szólt, ezért Balog Zoltán miniszter úron keresztül az Emberi Erőforrások Minisztériumát is megnyertem az ügy támogatójának. Folyamatos támogatást kapunk a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatalától is. Részt vesz a programban a Gábor Dénes Alapítvány és az ipar is. Bekapcsolódott a Széchenyi Irodalmi és Művészeti Akadémia, valamint Magyar Művészeti Akadémia is. A Programbizott-

ságban az említett szervezetek, intézmények képviselőin kívül az MTA minden osztálya és az MTA vezetése is jelen van.

– A hazai eseménysorozat gerincét a központi rendezvények jelentik. Kérem, soroljon fel néhányat ezek közül!

– Számos központi rendezvényt tartottunk. Az MTA Székház dísztermében volt februárban az ünnepélyes megnyitó, amelynek nagy sikere volt. Júniusban ugyancsak itt, a Díszteremben tartottunk diákok számára előadásokat *Fény és tudomány a fény városában* címmel, a terem megtelt diákokkal, legnagyobb örömmünkre. A kémikusok nyári táborát szervezték, a csillagászok a részleges napfogyatkozás bemutatását szervezték itt a székház előtti



A május 21-i fénystaféta során a fényjelek két óra alatt körbeutazzák az országot (Forrás: fenyveve.mta.hu)

téren. Az orvosok, a biológusok, a fizikusok, sőt a diákok is szerveztek programokat, ezek mind megtalálhatók a fenyveve.mta.hu honlapon. Tavasszal Szegedről indulva „körbezavarták” a fényt az egész országon, van is egy térkép, merre járt a fény. Ebben az évben az Eötvös Egyetem „Atomcsill”, vagyis *Az atomoktól a csillagokig* programja is a fényhez kapcsolódik. Az Akadémián szemészeti konferenciát tartottunk, fizikusok és orvosok részvételével a lézerek szemészeti alkalmazásairól. Az MTA Közgyűlése alkalmából, májusban szinte minden akadémiai osztály szervezett a Fény Évéhez kapcsolódó tudományos ülést. Fotópályázatot is hirdettünk, amelyre nagyszerű képek érkeztek (lásd belső borítóloldalunkat). A tíz legjobb képet Párizsban, a magyar nagykövetségen decemberben tartandó magyar napon is bemutatjuk, az ott tartandó előadások és filmvetítés kiegészítéseként.

Önálló szekciót rendezünk a Fény Éve alkalmából a novemberben Budapesten tartandó World Science Forum keretében. Ezt a már említett John Dudley fogja moderálni, az egyik előadás az ESA Rosetta űrszondájának az eredményeiről fog szólni, az Európai Déli Observatóriumokról is várunk egy előadót, lesz előadás az ESA Planck-küldetéséről és az ELI konzorciumról is egy német professzor részéről. Végül, de nem utolsósorban saját kutatási területemről, az új típusú fényről, azaz a felületi plazmonokról is lesz előadás, amelyet egy magyar származású amerikai professzor, Naomi Halász tart. A szekción kívül az egyik plenáris előadást az a japán kollégám tartja majd, aki két társával együtt 2014-ben a kék LED kifejlesztéséért kapott Nobel-díjat.

– Az ENSZ határozata a fény és a fény alapú technológiák nemzetközi évéről szól, a magyar elnevezésből a technológiák kimaradtak. Szándékosan? Az egyszerűség kedvéért? Az MTA-nak ez kevésbé tartozik a profiljába? Pótoljuk most a hiányt!

– Talán az egyszerűség kedvéért maradt ki a megnevezésből. Az MTA Műszaki Tudományok Osztályán keresztül azonban a technológiák is jelen vannak a programokban. Emellett sok ipari céggel kerültünk kapcsolatba, azok is különböző programokkal, ak-



A Pannon Egyetem szakemberei is részt vettek a Sixtus-kápolna LED-es világításának megtervezésében (Forrás: ledpont.eu)

ciókkal kapcsolódtak be a Fény Évébe. Itt is csak egyetlen példát említek. A Fény Évéhez kapcsolódó, nagy jelentőségű eredmény volt a Sixtus-kápolna világításának megtervezése, amiben a Pannon Egyetem szakemberei vettek részt. Ez sikeresen kapcsolta össze a műszaki, a művészeti és az egyházi vonatkozásokat.

– Az MTA önálló honlapot szentelt a Fény Évének (fenyveve.mta.hu), amely azonban csak a legfontosabb eseményekről, rendezvényekről ad hírt. Emellett rengeteg helyi program volt és lesz, saját honlapokkal. Ezeket hogyan tudják összefogni?

– A Programbizottság még jóval a Fény Éve hivatalos megnyitása előtt levélben szólította meg az iskolák igazgatóit, aminek nagyon pozitív fogadtatása volt. Felhívtuk a figyelmüket az eseményre, és azt kértük tőlük, hogy a tanórákon kapjanak hangsúlyt a fényhez kapcsolódó témák, szervezzenek versenyeket, kiállításokat, az iskolai ünnepeken szerepeltessenek a fényhez kapcsolódó művészeti alkotásokat. Rengeteg iskolai kezdeményezés volt, amelyeket támogatóinknak köszönhetően anyagilag is tudtunk segíteni. Ezekről mind visszajelzéseket kapunk, mert a beszámoló volt az anyagi támogatás feltétele. Így ezeket itt a Programbizottságban összesíteni tudjuk, teljes képet kapunk az iskolai rendezvények sokaságáról. Januárban tartunk majd egy záró programbizottsági megbeszélést, akkorra lesz teljes képünk a hazai rendezvényekről. Februárban, a hazai indítás évfordulóján ünnepi sajtótájékoztatót tartunk. Addigra áll össze az a jelentés, amelyet majd az ENSZ-nek készülő jelentéshez beküldünk.

– Tudnak-e például eszközöket is adni az iskoláknak, kihelyeznek-e előadásokat, rendezvényeket, vagy „csak” a figyelem felkeltése a cél?

– Erre egyetlen példát említek. A Tungsram tíz olyan, egyenként százezer forint értékű lámpakomplexumot ajánlott fel, amelyben volt hagyományos izzólámpa, lumineszcens lámpa és LED is. A diákok ezekkel mérték, utcai és belső világításokat terveztek, kísérleteket végeztek. A tungsramosok azt mondták, hogy olyan mérési jegyzőkönyveket kaptak, amelyeket megcsodáltak. A lámpák az iskoláknál maradtak, de a nagy sikernek köszönhetően a Tungsram még három lámpaegyüttest felajánlott, amelyek most körbejárnak más iskolákban.

– Az MTA honlapján négy fő témakör szerepel: tudomány, művészet, ipar, oktatás. Beszélgetésünkben még nem esett szó a művészetről. Milyen aktuális példát említene a fény és a művészetek kapcsolatáról?

– Ezzel kapcsolatban Kepes György történetét mondanám el. Kepes a Fásori Gimnáziumban érettségizett, de a karrierjét Amerikában futotta be. Ő alapította ott az első fényművészeti intézetet, amelyik egy műszaki egyetemen, az MIT-n működött. Többek

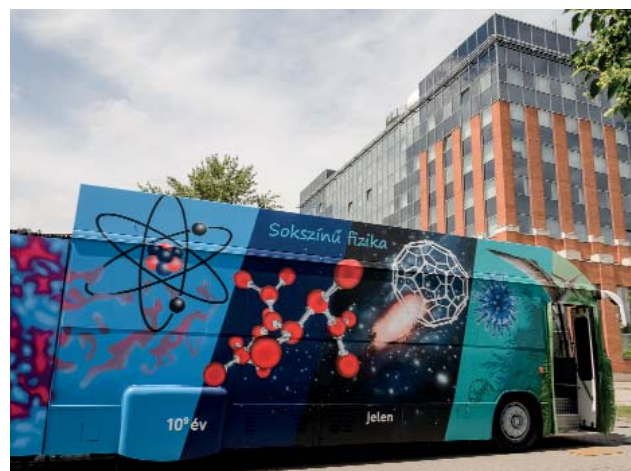
közt Csáji Attila fényművészünk is dolgozott nála ösztöndíjasként. A történet vége az, hogy a Fény Évéhez kapcsolódóan éppen a napokban volt alkalom megnyitni Egerben a Kepes Központot és az ottani Kepes–Csáji fényművészeti kiállítást. Az ugyancsak fényművészettel foglalkozó Mengyán Andrásnak is van egy galériája Budapesten, az Akácfa utcában, ott is nemrég nyitottam meg egy fényművészeti kiállítást.

– A nemzetközi programban kiemelt a csillagászat szerepe, neveztve megjelenik a „Cosmic light”, vagyis a kozmikus fény alprogram. Az MTA Fény Éve honlapján a hírek között is öröndetesen sok a csillagászati vonatkozású. Minek köszönhető ez a népszerűség?

– A csillagászat sokakat érdekel, könnyű népszerűsíteni. Örülök neki, hogy így van, ezért támogattunk egy csillagászati nyári tábor, támogattuk, hogy fiatalok Piszkes-tetőre mehessenek mérni és azt is, hogy a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont rendszeresen jelentessen meg csillagászati vonatkozású híreket a Fény Éve honlapon.

– Az ismeretterjesztés hagyományos formáihoz, az előadásokhoz, konferenciákhoz, kiállításokhoz képest újszerű kezdeményezés volt a Sokszínű Fizika Roadshow és Busz. Milyen volt a fogadtatása?

– A Sokszínű Fizika Roadshow egynapos programot kínál az érdeklődő iskoláknak. A rendezvény elsősorban középiskolásoknak szól, de gyerekeknek és felnőtteknek egyaránt érdekes lehet. Egy rendezvény során 45 perces ismeretterjesztő előadásokat hallgathatnak meg az érdeklődők, melyeken aktív kutatók mutatják



A Sokszínű Fizika Busz az ELTE épülete előtt

(Forrás: fenyveve.mta.hu)

be a legújabb eredményeket, technikai újdonságokat, tudományos felfedezéseket. Emellett izgalmas interaktív kísérleti bemutatókra kerül sor. A roadshow egy félévben több iskolába is ellátogat. A Sokszínű Fizika Roadshow az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont koordinálásával, az MTA EK és az MTA EK MFA közreműködésével valósul meg. Ezt a programot a Sokszínű Fizika Busz segítségével valósítjuk meg. Az interaktív, utazó kiállítás a fizika széles palettáját mutatja be a látogatóknak. A buszban demonstrátorok vezetnek végig a látogatókat, akik kipróbálhatják a kísérleti eszközöket és érdekes információkkal lehetnek gazdagabbak. A busz külső megjelenése egy graffiti-művész csapat munkája, mely már messziről hirdeti, milyen sokszínű lehet a fizika. Ahogy a roadshow tavaly a CERN 60 rendezvénysorozathoz, úgy idén a Fény Éve nemzetközi programjához csatlakozott, ahhoz igazítva az előadások tematikáját.

– A Fény Éve koordinálásával az MTA egy elsősorban ismeretterjesztő célú megmozdulás élére állt, ami ismeretterjesztéssel fog-



Don Petit amerikai űrhajós a Nemzetközi Űrállomásról fényképezte le a Föld fényeit, a csillagokat és a sarki fényt (Forrás: NASA/JSC, www.light2015.org)

lalkozó lapunk számára különösen öröndetes. Egyetért-e ugyanakkor azzal a véleménnyel, hogy a legkiválóbb hazai tudósok közül többen nem érzik át eléggé az ismeretterjesztés fontosságát? Hozott-e ebben szemléletváltozást a Fény Éve?

– Az az érzésem, hogy igen. Néhány olyan előadást is hallottam ebben az évben, amiket olyanok tartottak, akikről nem gondoltam volna, hogy jó ismeretterjesztő előadást tudnak tartani. Sokukban kellemesen csalódtam, mert kitűnő előadások voltak. Ezt persze nem lehet mindenkitől elvárni. Elmozdultunk tehát a jó irányba, de még sok hasonló lépést kellene tenni. Talán újabb, a Fény Évéhez hasonló, a szakembereket megmozgató kezdeményezésekre lenne szükség.



Luisa Cifarelli, az Európai Fizikai Társaság (EPS) korábbi elnöke és Kroó Norbert, az EPS tiszteleti tagja avatta fel az emléktáblát, mely szerint a Budapest-Fasori Evangélikus Gimnáziumot az EPS nemzetközi fizikátörténeti emlékhellyé nyilvánította (Forrás: MTA)

– A programokban aktívan részt vevő iskolák közül emeljük ki a Fasori Gimnáziumot, amelyet az Európai Fizikai Társulat éppen idén nyilvánított nemzetközi fizikátörténeti emlékhellyé. Ez elsősorban annak köszönhető, hogy ott tanult Wigner Jenő és Neumann János. De hogyan kapcsolódik ez a megtisztelő kitüntetés a Fény Évéhez?

– Wigner Jenő személyén és munkásságán keresztül kapcsolódik. A Fasori Gimnáziumot én javasoltam, mert úgy gondoltam, hogy ez méltó emlékezés a Nobel-díjas Wigner Jenőre, az iskola egykori diákjára. A javaslatomat elfogadták, az ATOMKI után így

lett a Fasori Gimnázium a második magyarországi fizikátörténeti emlékhely. Jelenleg Európa 14 országában 22 ilyen emlékhely van, tehát ritka az, hogy egy országban két helyszín is elnyerje az EPS elismerését. Az emlékhellyé nyilvánítást tudatos emléktáblát áprilisban Luisa Cifarellivel, az EPS korábbi elnökével együtt avattuk fel az iskola előkertjében.

– Wigner Jenőhöz kapcsolódóan engedjen meg egy személyes kérdést. Ön 1963–64-ben a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség ösztöndíjával Svédországban kutatott, éppen akkor, amikor Wigner Jenő átvette a Nobel-díjat. Ekkor alkalma volt személyesen is találkozni Wignerrel. Milyen hatással volt a pályakezdő fizikusra a találkozás Nobel-díjas honfitársával?

– Akkoriban én voltam ott az egyetlen magyarországi magyar, ezért minden alkalmat megragadtam, hogy találkozzunk, még a Nobel-ebéden is ott voltam. Kapcsolatunk a továbbiakban is megmaradt, az elnökségem alatt választottuk őt az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteleti tagjává, és másokkal együtt javasoltam őt az MTA tiszteleti tagjának is.

Akkor, ott Stockholmban sokat beszélgettünk, elsősorban szakmáról, de egészen hétköznapi, a magyarországi mindennapi életet érintő kérdésekről is. A szakmai pályafutásomra talán még nagyobb hatással volt egy másik Nobel-díjas fizikus, Ilja Mihajlovics Frank. Dubnában az Egyesített Atomkutató igazgatója volt, én pedig a helyetteseként dolgoztam. Bár 25 év korkülönbség volt közöttünk, és mint említettem, már akkor megkapta a Nobel-díjat, mégis mindig egyenrangú félként kezelt. Nemcsak szakmailag, hanem emberileg is nagyon sokat tanultam tőle.

Hasonlóképpen attól a svéd professzortól is, akinek annak idején a csoportjában dolgoztam. Amikor 1964-ben befejeződött a 14 hónapos kinti munkám, búcsúzásul azt mondta, hogy „Norbert, mi legalább annyit tanultunk Tőled, mint Te tőlünk”. Amikor ott lehettem, akkor volt a svéd fizika aranykora.

– A Fény Éve még távolról sem ért véget, de a féledőn már bőven túl vagyunk. Előzetes összegzésként mondana valamit a személyes benyomásairól a Fény Éve hazai fogadtatását illetően?

– A Fény Évét ürügynek tartom arra, hogy olyan dolgoknak hangsúlyt adjunk, amiket az egész társadalom számára fontosnak tartunk, és amik valamennyire a tudományhoz is kötődnek. Ez éppen az a négy terület, amelyet az UNESCO is kiemelt: a tudomány, a technológia, a természet és a kultúra. Ezen kívül azt is fontosnak tartottam, hogy a jövő számára dolgozzunk, tehát itt nem az akadémikusoknak kell klubot szervezni, hanem a diákokat kell beoltni a tudomány szeretetével. A harmadik, ami szerintem fontos, hogy aki a múltját nem becsüli, a jövőt sem érdemli meg, mert eltéveszti az utat, ha nem a múlton jár. Ezért fontosnak tartom, hogy azokra az eredményekre, amelyek ezen a területen például Magyarországon születtek, Bródy Imrétől Kepes Györgyig, azokra, a Fény Éve alkalmából illő módon „rávilágítsunk”. ☀

Az interjút készítette: BOTH ELŐD

További információk:

Nemzetközi Fény Éve honlap (EPS, UNESCO):

<http://www.light2015.org/Home.html>

Magyar Fény Éve honlapok:

MTA: <http://fenyve.mta.hu/>

Eötvös Loránd Fizikai Társulat: <http://elft.hu/fenyve2015>

UNESCO Magyar Nemzeti Bizottsága:

<http://www.unesco.hu/termesettudomany/feny-fenyalapu>

Az interjúhoz kapcsolódó egyéb események honlapjai:

Az EPS híre a Fasori Gimnázium nemzetközi fizikátörténeti emlékhellyé nyilvánításáról: https://eps.site-ym.com/?page=distinction_sitesFLS

Sokszínű Fizika: <http://www.sokszinufizika.hu/>

Nemzetközi fénytárféta (2005): <http://www.aps.org/publications/apsnews/200506/relay.cfm>

Magyar fénytárféta (2015. V. 21.): <http://fenyve.mta.hu/event/orszagos-fenytaarfeta/>

Az atomoktól a csillagokig (ELTE): <http://www.atomcsill.elte.hu/>

A fizika mindenkié (KFKI): <http://afizikamindenkie.kfki.hu/>

Évfordulók

Az ENSZ Közgyűlése 2013. december 20-án hozott, A/RES/68/221. számú határozatában nyilvánította 2015-öt a fény és a fény alapú technológiák nemzetközi évévé. A határozat indokolásában több „kerek” évfordulót is felsorolnak annak alátámasztására, miért éppen 2015 legyen a fény éve.

- 1000 évvel ezelőtt, 1015-ben jelent meg *Alhazen* (eredeti teljes nevén *Abu Ali al-Haszan ibn al-Haitam*) arab tudós *Optika* című könyve. Alhazen 96 könyvet írt, amelyekből 55 maradt fenn, az *Optikán* kívül több is foglalkozik a fénnel (*A Hold fénye*, *A halo és a szivárvány*, *A parabola alakú gyújtótükrökről*, *Az árnyékok kialakulása*, *A csillagok fénye*, *Értekezés a fényről*, *A gyújtó gömb és A fogyasztás alakja*). Optikai kísérleteket végzett, helyesen értelmezte a fénytörést, és rájött, hogy a látás nem a szemből kiinduló, hanem a tárgyról a szembe jutó fénysugarakkal történik.
- 200 évvel ezelőtt, pontosabban 1815-től egy évtizeden keresztül *Augustine-Jean Fresnel* francia mérnök és műkedvelő fizikus jelentős eredményeket ért el az optikában. Kísérletekkel igazolta a fény hullámtermészetét, matematikailag pontosan leírta a hullámjelenségeket, vizsgálta a polarizáció jelenségét, és eredetileg a világítótornyokban való használatra kifejlesztette a koncentrikus üveggyűrűkből álló, a hagyományosaknál hatékonyabb lencsét, amelyben az egyes gyűrűk görbülete kissé különböző (Fresnel-lencse).
- 150 évvel ezelőtt írta le elsőként – elméleti lehetőségként – *James Clerk Maxwell* az elektromágneses hullámokat. Létezésükre az előző évben megjelent, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (Az elektromágneses tér egy dinamikus elmélete) című cikkében felírt, az elektromosság és a mágnesség jelenségeit egyesítő formuláiból, a Maxwell-egyenletekből következtetett. Kísérletekkel igazolta, hogy az egyenleteiben szereplő c állandó azonos a fény sebességével. Az elektromágneses hullámok létezésének kísérleti igazolását (Heinrich Hertz) azonban már nem érte meg.
- 110 évvel ezelőtt publikálta *Albert Einstein* az úgynevezett „csodálatos évében” *A fény keletkezésével és átalakulásával kapcsolatos heurisztikus nézőpontról* című dolgozatát a fényelektromos jelenség magyarázatáról. Ebben feltételezte, hogy a fény energiakvantumokból, azaz fotonokból áll, lefedtetve ezzel a

kvantummechanika alapjait. Elsősorban ezért a munkájáért kapta meg 1921-ben a Nobel-díjat: „érdeműs matematikai-fizikai kutatásaiért, különös tekintettel a fotoelektromos effektus törvényének a felfedezésére”.

- (Csaknem) 100 évvel ezelőtt (1916-ban) publikálta *Albert Einstein* *Az általános relativitáselmélet alapjai* című munkáját. Elméletében a gravitációt a tér szerkezete módosulásaként írja le: „a gravitációs mezőt meghatározó függvény egyúttal a négydimenziós tér metrikus tulajdonságait is meghatározza”. Ennek megfelelően a fény terjedése is a tér tömegek által módosított szerkezetét követi, létrehozva csillagászati megfigyelésekkel igazolt gravitációs fényelhajlás és a gravitációs lencse jelenségét.
- 50 évvel ezelőtt fedezte fel *Arno Penzias és Robert Wilson* – véletlenül, egészen más irányú vizsgálódásaik „melléktermékeként” – a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzást, a tér minden irányából érkező, közel 3 K hőmérsékletű feketetest-sugárzást, a 13,8 milliárd évvel ezelőtti ősrobbanás maradványsugárzását. Felfedezésük fontos mérföldkő volt a kozmológia szilárd alapon nyugvó természettudománnyá válásának útján, ma a mikrohullámú háttérsugárzás műholdas mérésével tudunk bepillantani a Világegyetem régmúltjába. Felfedezésükért 1978-ban kapták meg megosztva a fizikai Nobel-díjat.
- Ugyancsak 50 évvel ezelőtt, az 1960-as évek közepén végezte *Charles K. Kao* kínai–amerikai–brit villamosmérnök és fizikus úttörő kísérleteit a teljes fényvisszaverődés elve alapján működő optikai szálakkal. Az optikai távközlés alapjainak lefedtetése érdekében végzett munkáját 2009-ben fizikai Nobel-díjjal ismerték el. Az optikai szálon továbbított jelek nem érzékenyek az elektromágneses zavarokra, kicsi a jelek csillapítása, nagy adattovábbítási sebesség érhető el, egyszerre nagyszámú csatorna jelei továbbíthatók. Előnyös tulajdonságainak köszönhetően az optikai szálak egyre inkább kiszorítják a rézvezetéseket a hírközlésből.



A felsorolt eredmények nem mindig köthetők pontosan egyetlen évhez, ám a javaslattevők fontosnak tartották ezen évfordulók hangsúlyozását. Ugyanakkor nem szabad elfeledkeznünk arról, hogy a fény kutatásának és alkalmazásának számtalan további eredménye is van, amelyek nem kevésbé jelentősek, ám éppen nincs „kerek” évfordulójuk.

B. E.



Az ezeréves mű, Alhazen *Optikája* első latin nyelvű kiadásának címlapja 1572-ből

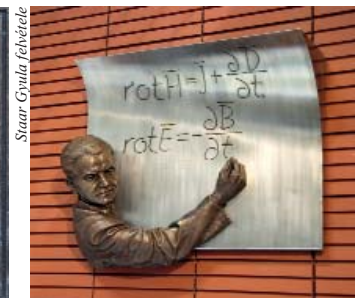


Forrás: Wikipedia

Forrás: Wikimedia Commons



A Maxwell-egyenletek James Clerk Maxwell edinburgh-i szobrának talapzatán



Simonyi-szobor Maxwell-egyenletekkel (BME, Q épület, Budapest)

Világítótornyban használt, nagyméretű Fresnel-lencse a kaliforniai Point Arena Világítótorny Múzeumban

A fény Nobel-díjasai

I. A fénysugárzás modern elméletének kialakulása a fizikai Nobel-díjak tükrében

ABONYI IVÁN

Alfred Nobel (1833. október 21., Stockholm – 1896. december 10., San Remo) autodidakta vegyész, sok nyelven beszélő mérnökember, sokoldalúan tájékozott bányászati szakember vagyonából tudományos, irodalmi és békedíjat alapított. Idézzük végrendeletéből: „Hagyatékomban gondnokai által biztos értékpapírokban elhelyezett tőkém alapot képeznek majd, melyek évi kamatai azok számára osztassanak fel, akik az elmúlt esztendőben a legnagyobb hasznot hajtották.” Így kerülhetett sor a fizika, a kémia, az orvostudomány (fiziológia), az irodalom és a békés együttélés terén a legnagyobb jelentőségű eredményeket elért személyek (intézmények) kitüntetésére. A díj mellé érme is jár.

A megjelölt gondozó, elbíráló intézmények a fizika és a kémia terén a Svéd Tudományos Akadémia, az orvostudományokban a stockholmi Karolinska Intézet, az irodalomban a stockholmi Akadémia, a béke ügyében pedig a norvég parlament (Storting) által választott bizottság. Ezek döntenek a legméltóbbak kiválasztásáról, a döntésben nem lehet szempont a nemzeti hovatartozás. A vagyon az induláskor 50 millió svéd korona volt. A gondnokok munkáját dicséri, hogy 1901, az első díjkiosztás óta a tőke kamatai még mindig igen tekintélyes összeget jelentenek. Pedig az eltelt 125 év alatt két ízben is megrázta a világ gazdaságát a világháború. (A háborús években a díj kiosztása szünetelt.)



A NOBELDÍJ ÉRME/ALFRED NOBEL (1833–1896)

Előzmények

Az alábbiakban felsorolandó kitüntetetteket úgy választottuk ki, hogy szoros összefüggésben legyenek a fény természetének megismerésével. Ehhez azonban szükséges, hogy rövid összefoglalást nyújtsunk arról, mi is történt a témában az első díjkiosztás előtt.

A sors úgy hozta, hogy a XX. század fordulójára tájékozott a fény-nyel kapcsolatban a fizikai tudás terén fontos átalakulás zajlott le. Ez a villamosság alaptermészete terén az alapvető, átfogó elektrodinamikai alaptörvények felismerése volt. Ez a világméretű elektrifikáció, a villamos áram előállítása és nagyméretű ipari, gyakorlati alkalmazása, a közlekedési, közvilágítási, energiatovábbítási igények növekedése, az eredmények gyors elterjedése nyomán alakult ki. *James Clerk Maxwell* (1831–1879), *Oliver Heaviside* (1850–1925), *Heinrich Hertz* (1857–1894) dolgozták ki az egységes elektromágneses erőter törvényeit és Hertz ismerte fel, hogy a fény is az elektromágneses jelenségek, a hullámok egyike. Ez az azonosítás döntő lépés volt mind a fizika alapjai, mind ipari (kohászati) alkalmazásai, mind csillagászati szempontból. A sugárzó anyag hőmérséklete és kisugárzott teljesítménye között *Ludwig Boltzmann* (1844–1906), a hőmérséklet és a sugárzás maximális intenzitású hullámhossza között *Wilhelm Wien* (1864–1928) állapított meg összefüggést.

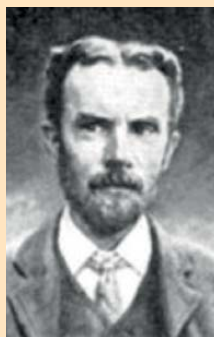
Nobel-díjasok

Csak az intenzitás frekvencia szerinti eloszlása volt még kérdéses. Ezt a problémát *Max Planck* (1858–1947) hosszú próbálkozások után 1900-ban azzal a forradalmi lépéssel oldotta meg, hogy feltette, a sugárzás, ami a forró üreg belsejéből ered (termodinamikai

egyensúly esetén az „abszolút” fekete testből), nem folytonosan változó energiájú, hanem diszkrét, mai szóval kvantáltan változó rezgésekből adódik. Ezek energiája a nevezetes Planck-állandó és a frekvencia szorzata. Planck ezért a Nobel-díjat 1918-ban kapta. Később, 1905-ben *Albert Einstein* a fényelektromos hatás magyarázatára bevezette a fény részecskéjére a foton fogalmát. Ezzel – többek között – az is lehetővé vált, hogy *Niels Bohr* (1885–1962) megalkossa 1913-ban az atom modelljét, amiben a pozitív töltésű atommag körül a negatív töltésű elektronok keringenek a Coulomb-törvényben leírt vonzóerő következtében, de a lehetséges pályákat az választja ki, hogy ott az impulzusnyomaték a Planck-állandó egész számú többszöröse. Bohr ezért Nobel-díjat 1922-ben kapott, míg Einstein nem a relativitáselméletért, hanem a fényelektromos hatás magyarázatára bevezetett fotonért 1921-ben. A Bohr-modell, az atom első közelítő modellje – korlátai ellenére – óriási jelentőségűnek bizonyult, mert a különböző atomfajták által kibocsátott fény színképi tulajdonságait elég jól magyarázta, sőt annyira, hogy a vegyészek jelentős eredményeket értek el. A további fejlődés során az így kialakított atommodell újabb vonásai tisztázódtak. *Clinton Joseph Davison* (1881–1958) amerikai fizikus 1927-ben kísérletekkel, amiket *L. H. Germer* munkatársával együtt hajtott végre, kimutatta, hogy az elektron is hullámként viselkedik. Ezért Davison a Nobel-díjat meglehetősen későn, 1937-ben kapta meg. Közben, felismerve „az anyag kettős természetét”, tehát azt, hogy hol hullámként, hol részecskéként viselkednek az atomi részek, *Louis de Broglie* (1892–1989) 1923 őszén arra a megállapításra jutott, hogy minden korpuszkuláris (részecske-) sugárzás hullámtulajdonságokkal is rendelkezik. Ennek a hullámjelenségnek a jellemzője a de Broglie-hullámhossz. Ezt a hullámszerű viselkedést mutatta ki kísérletileg Davison és Germer. De Broglie a Nobel-díjat 1929-ben kapta meg. Az atomi részek te-



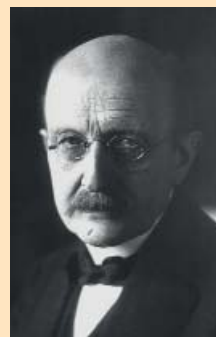
James Clerk Maxwell
(1831–1879)



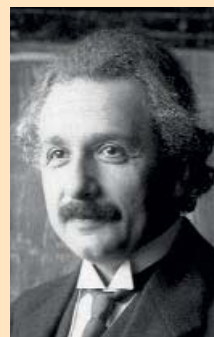
Oliver Heaviside
(1850–1925)



Heinrich Hertz
(1857–1894)



Max Planck
(1858–1947)



Albert Einstein
(1879–1955)



Niels Henrik David Bohr
(1885–1962)



Victor Franz Hess
(1883–1964)



Pavel Alekszejevics
Cserenkov (1904–1990)



Igor Jevgenyevics Tamm
(1895–1971)



Ilja Mihajlovics Frank
(1908–1990)



Charles Hard Townes
(1915–2015)



Nyikolaj Gennagyijevics
Baszov (1922–2001)

rén megmutatkozó hullámszerű viselkedés felvetette azt a kérdést, hogy ezt a részecskehullám-kettősséget a klasszikus elmélet nem írja le, szükséges megtalálni az új elméleti keretet. Először *Erwin Schrödinger* (1887–1961) próbálkozása látott napvilágot 1926-ban. Schrödinger felállított egy parciális differenciálegyenletet, amely egyszerre több feladat megoldását kínálta. Részben a klasszikus elmélet kétszáz éve bevált formanyelvét általánosította, részben magában foglalta az anyag kettős természetét (főleg a hullámtulajdonságot). Az egyenlet megoldásával nyert hullámfüggvény, a nevezetes ψ az anyagi „részecske” kiterjedt, hullámszerű viselkedéséről is számot adott. Ezzel az eredménnyel, ami a matematikai analízis nyelvén fogalmazódott meg, közel egy időben jelentek meg *Werner Heisenberg* (1901–1976) kutatási beszámolói, melyekben az atomi viselkedés más nyelven történő megfogalmazásáról, a mátrixokról volt szó. Ez a mátrixos mechanika mintegy előrevetítette az anyag kettős természetét, mondván, hogy amilyen tulajdonság nincsen (megfigyelhető állapotban), arról ne is beszéljünk. Azt már Schrödingernél is lehetett látni, hogy az atomban kötött elektron helyét az atomon belül nem lehet megadni, mert ott van ugyan, de az atom térfogatában mindenütt, mintegy elkenve, mert mozog. Viselkedését a Heisenberg-reláció jellemzi, egy egyenlőtlenség, mely szerint a hely Δx bizonytalansága (a klasszikus fogalmak szerint) és az impulzus Δp bizonytalansága olyan, hogy összefüggenek, $\Delta x \cdot \Delta p \sim h$, vagyis szoroztuk a Planck-állandó nagyságrendjébe esik. Ez egyébként a Schrödinger-egyenlet szerint is így van, más szóval a Heisenberg-féle mátrix-mechanika a Schrödinger-féle (analitikus) kvantummechanika ugyanannak az „atomelméletnek” két, egyenrangú nyelvezete. Schrödingernek jutott az a szerep, hogy a két elmélet egyenértékűségét is kimutassa. Schrödinger 1933-ban, Heisenberg 1932-ben kapott Nobel-díjat. A következő kutató *Paul A. M. Dirac* (1902–1984), aki a kvantummechanika újszerű felépítése mellett azt is elérte, hogy egyrészt az elektron tulajdonságai közül a nemrégiben felismert új sajátosság, a spin, valamint az elektron (és más feles spinű részecskék, a proton és a neutron stb.) egy új „állapotegyenletnek” felel-

nek meg, a későbbiekben Dirac-egyenletnek nevezett dinamikai egyenletnek tesznek eleget. Ennek érdekes következménye az, hogy az h spinű (saját impulzusnyomatékú) részecskének van „antirészecske” párjuk. *Carl David Anderson* (1905–1991) és *Victor Franz Hess* (1883–1964) a kozmikus sugárzás vizsgálatára kifejlesztett ködkamrájával felfedezte az elektron antirészecskéjét 1932-ben. Ezért a felfedezésért előbb az elméleti kutató, Dirac kapott Nobel-díjat 1933-ban, majd Anderson és Hess 1936-ban. A részecske-antirészecske feles spinű párok keltése megfelelően nagy energiájú fotonból későbbi megfigyelések szerint folytatódott (proton-antiproton, neutron-antineutron, neutrínó-antineutrínó).

Az elektromágneses erőter érdekesebb tulajdonságát fedezte fel 1934-ben *Pavel Alekszejevics Cserenkov* (1904–1990). A róla elnevezett effektus lényege az, hogy ha átlátszó közegben (eredetileg folyadéokban) haladó elektromosan töltött részecske sebessége nagyobb, mint az illető közegben a fénysebesség (ami természetesen kisebb, mint a vákuumbeli fénysebesség), a töltés elektromágneses tere (a „fény sugárzása”) leszakad a töltésről és jellegzetes irányban terjed tovább. Cserenkov kísérleti megállapítására *Igor Jevgenyevics Tamm* (1895–1971) és *Ilja Mihajlovics Frank* (1908–1990) adott magyarázatot. Eszerint a közegbeli fénysebességnél gyorsabban mozgó elektromosan töltött részecske az elektromágneses tere (az általa kibocsátott fény csak kisebb sebességgel tud terjedni a közegben) és a közeg törésmutatója által meghatározott irányban (a töltés mozgásához képest ferde irányban) hagyja el a töltést, mert lassabban terjed, mint ahogy a töltés mozog. Ezt a sugárzást azóta számos mérésben használják fel, a legérdekesebbek az űrkutatás során alkalmazott műszerek. Ezért a felfedezésért mindhárman 1958-ban kaptak Nobel-díjat.

1964-ben *Charles Hard Townes* (1915–2015), *Nyikolaj Gennagyijevics Baszov* (1922–2001) és *Alekszandr Mihajlovics Prohorov* (1916–2002) egyszerre kaptak Nobel-díjat kvantumelektrodinamikai munkásságukért. Ebben fő szerepet játszott az, hogy a mézerekkel és lézerekkel, az általuk szerkesztett és konstruált be-



Clinton J. Davisson
(1881–1958)



Louis de Broglie
(1892–1997)



Erwin Schrödinger
(1887–1961)



Werner Karl Heisenberg
(1901–1976)



Paul A. M. Dirac
(1902–1984)



Carl David Anderson
(1905–1991)



Alekszandr Mihajlovics
Prohorov (1916–2002)



Hannes Olof Gösta Alfvén
(1908–1995)



Arno Allan Penzias
(1933–)



Robert Woodrow Wilson
(1936–)



George F. Smoot
(1945–)



John Cromwell Mather
(1946–)

rendezésekkel tanulmányozták a mikrohullámú elektromágneses sugárzás egyetlen frekvencián való erősítését (maser) és a fénysugárzás hasonló problémáit (laser). Erőfeszítéseiket siker koronázta, mára már kifejlesztett berendezések vannak, a mézerek és lézerek (a magyar szóhasználat szerint) a tudományok és a technika szolgálatában.

A következő személyiség, aki az elektromágneses erőter, a fotonok összefoglaló elmélete területén nagyot és újat alkotott, *Hannes Alfvén* (1908–1995) svéd fizikus volt. Alfvén képzettsége szerint elektromérnök volt, pályáját 1934-ben kezdte Uppsala egyetemén, miután megszerezte doktori címét. Mint elektrodinamikus, hamarosan a stockholmi Nobel Intézetbe került, ahol 1940-től mint professzor foglalkozott a kozmikus elektrodinamikával. Hamarosan felfedezte a kozmikus mágneses erőter jelentős szerepét, többek között a később róla elnevezett Alfvén-féle hullámokét. Ezek a hullámok a mágnesezett plazma olyan rezgéseit kísérik, amelyek a mágneses erővonalak mentén alakulnak ki, s a kozmikus térségekben az erővonalakra merőleges amplitúdóval járnak, miközben csak a plazma sűrűsége rezeg velük együtt. Alfvén a II. világháború után Amerikában járva Enrico Fermi is hosszú órákon keresztül gyözködte a hullámok természetéről. Ferminek ugyanis fontos volt a kozmikus sugárzásra vonatkozó elméletének kidolgozásában a hullámtípus megértésére. Visszautazása napján kapta meg Alfvén Fermi levelezőlappját arról, hogy elfogadja az Alfvén-hullám koncepcióját. A plazmák folyadékelméletének szerepét beöltő magnetohidrodinamika koncepciójának következetes kidolgozása Alfvén alkotása, a „Kozmikus elektrodinamika” című munkája 1948-ban jelent meg, később, az új fejlemények feldolgozásával *C. G. Fälthammar*al kiegészítették a kötetet 1963-ban (Kozmikus elektrodinamika – Alapelvek). Alfvén a magnetohidrodinamika alapján az atommag folyadékcsepp-modelljében is kiértékelte az Alfvén-hullám lehetséges szerepét, majd *G. Arrhenius*-szal együttműködve a Naprendszer szerkezeti és fejlődési történetét dolgozták ki. Kutatásainak elismeréséül 1970-ben kapott Nobel-díjat.

Arno Allan Penzias (1933–) és *Robert Woodrow Wilson* (1936–) amerikai csillagászok és asztrofizikusok 1965 nyarán közzétett eredményük szerint rádióteleszkóppal felfedezték, hogy létezik a kozmikus háttérsugárzásban 7,35 cm hullámhossznak megfelelően egy teljesen irányfüggetlen és évszakfüggetlen háttérsugárzás, ami egy kb. $3,5 \pm 1$ K (kelvin) hőmérsékletű közegtől származik, mely teljesen független minden földi eredetű, akár természetes akár mesterséges háttértől. Penzias és Wilson más kollégákkal együttműködve (R. D. Dicke és P. E. J. Peebles) ezt a háttérsugárzást a kozmikus ősrobbanás nyomán kialakult forró Univerzum visszamaradt elektromágneses sugárzásának tulajdonították. Ezt az ősrobbanás Univerzum keletkezés-elméletének bizonyítékául tekintik. Az ismételt vizsgálatok eredménye az lett, hogy a kozmikus háttérsugárzás 2,8 K hőmérsékletű Planck-eloszlásnak felel meg. Penzias és Wilson 1978-ban fizikai Nobel-díjat kapott.

A kozmikus háttérsugárzás pontos tanulmányozása céljával a COBE (Cosmic Background Explorer) nevű műholdat 1989-ben bocsátották fel. Ezt követően csakhamar nagy öröm érte az asztrofizikusokat. A felbocsátást követő első tíz percben (!) annyi mérési adat gyűlt össze, ami meghaladta az addig a Föld felszínén elért adatmennyiséget. Ráadásul a mérési adatokat sikerült pontosan ráilleszteni a $T = 2,725 \pm 0,002$ K foknak megfelelő Planck-görbére. Ez azt mutatta, hogy amikor a kozmikus háttérsugárzás végre lecsatlódott a táguló Univerzumban lévő túlnyomórészt hidrogénplazmáról (mert fotonjai már nem tudtak reakcióba lépni a hidrogénatomokkal, -ionokkal), azoktól független ideális gázt alkottak. A fotongáz tehát szabadon tágult – kölcsönhatás nélkül – az Univerzummal. Az elváláskor kb. 3000 K hőmérsékletű gáz most, a tágulás eredményeként kb. 1000 szeresére megnőtt térfogatban van, ami a hőmérsékletét éppen kb. ezredrészére szállította le. A mérés elvégzését és az eredmény kiértékelését *Georg Smoot* (1945–) és *John Mather* (1946–) amerikai fizikusok végezték és publikálták 1990 és 1992 között. Eredményüket 2006-ban Nobel-díj koronázta. ✨

II. Fénylő évek, nevek, események az orvosi, fizikai, kémiai Nobel-díjak történetében

RADNAI GYULA

A fényvel végzett sikeres kutatásokért járó Nobel-díjakról lesz szó, amelyek egy, két, vagy három kutatónak fényt, elismerést, világhírt vetítettek mindennapi életébe. Abban az évben, amikor a kutatók elnyerték a díjat, világszerte felfigyelt a nevük, amely addig csak szűkebb vagy tágabb szakmai körökben volt ismert. Ezt általában jól viselték, az ünneplések elmúltával pedig folytatták addigi kutatómunkájukat.

Nobel végrendeletének megfelelően az orvosi-fiziológiai díjat odaítélő stockholmi Karolinska Intézet, illetve a fizikai és kémiai díjat odaítélő Svéd Királyi Tudományos Akadémia döntését ma is öttagú bizottságok készítik elő. Ezek a szakmai Nobel-bizottságok értékelik az illető díjra abban az évben január végéig beérkezett jelöléseket, melyeket erre felkért egyetemi oktatók küldenek be a világ minden tájáról. Ma már több ezer ajánló több száz jelöltet nevez meg (többen is jelölik ugyanazt a személyt). A Nobel-bizottság külső szakértőket is felkérhet az általa kiválasztott, leginkább esélyesnek látszó jelöltek teljesítményének értékelésére, majd ezek ismeretében állapodik meg abban, kit javasol elfogadásra az illetékes intézetnek, akadémiának, ahol október elején döntenek a díjról, egyszerű szavazattöbbséggel.

A Nobel-bizottság öt tagját három évre választják, de ez a megbízás meghosszabbítható. Svante Arrhenius (1859–1927) svéd természettudós, a fizikai kémia tudományának egyik megalapozója például kezdettől fogva haláláig, tehát 27 éven át volt tagja a fizikai Nobel-bizottságnak. Véleménye, szava legtöbbször – ha nem is minden esetben – döntő volt a bizottságban, amint ez ma már, az 50 éves titkosítási időszak lejárta után, a megőrzött írásos dokumentumok alapján megállapítható.

A fényre vonatkozó kutatások, s így az értük adott Nobel-díjak témái is nagyon széles kört ölelnek fel. Érdemes belegondolni: az alábbi kezdő és a záró Nobel-díj kiadása között 111 év telt el! Nem is próbáltunk teljességre törekedni. Elhagytunk sok, „láthatatlan fényre” vonatkozó kutatást, például a röntgensugárzás egész témakörét, de még a látható fényre vonatkozó kutatásokért járó Nobel-díjak közül is néhányat. Az ok a terjedelmi korlát, amely még egy ilyen különszámban sem enged meg ennél hosszabb tanulmányi közze tételét. Szerencsére az irodalomban s főleg az interneten bőségesen található információ, ezért ez a cikk inkább csak kedvesítő a további olvasáshoz, kutakodáshoz.

1903. A gyógyító fény

Még csak harmadik éve osztották ki az Alfred Nobel (1833–1896) által alapított díjat, s ebben az évben már sor is került egy, a fény-nyel kapcsolatos kiváló kutatás elismerésére, mégpedig fiziológiai-orvostudományi területen.

Niels Ryberg Finsen (1860–1904) dán orvosnak „egyes betegségek, különösen a lupus vulgaris koncentrált fénysugarakkal való gyógykezelésének elismeréseként” ítélte oda a díjat a stockholmi Karolinska Intézet, amit maga Nobel jelölt ki 1895-ös végrendeletében e díj kiadására. Mi volt ez a „lupus vulgaris” nevű betegség és ki volt ez az orvos?

A lupus vulgaris olyan bőrbetegség volt, amit tuberkulózis bak-

térium okozott. Finsen sokféle kellemetlen betegsége mellett még krónikus bőrbetegségben is szenvedett, ebből való kigyógyulását pedig a napsugárzástól remélte. Alapos, más betegeken végzett körültekintő vizsgálatai során megállapította, hogy a látható fény rövidhullámú része (nem pedig a fény hőhatása) gyógyuláshoz vezethet. Elektromos ívlámpákhoz konstruált olyan optikai berendezést, amely kiszűrte a hősugarakat (a fény hosszabb hullámhosszú részét), a rövid hullámhosszú kék és ibolya színű fényt pedig kvarclencsékkel fókuszálta a gyógyítandó bőrfelületre. (A kvarclencsék az ultraibolya komponens is átengedték!) Koppenhágában fényterápiás intézetet alapított és vezetett, melyet azután a dán kormány is támogatott. Egyéni tragédiája, hogy saját életét nem sikerült meghosszabbítania: egy évvel a Nobel-díj elnyerése után, negyvennégy éves korában halt meg – igaz, nem bőrbetegségben.

1907. Egy korszakalkotó találmány

Nobel praktikus gondolkodásának megfelelően a fizikai díjat odaítélő Svéd Királyi Tudományos Akadémia kezdettől fogva előnyben részesítette azokat a kutatókat, akik a fizikai kutatás számára hasznos, új eszközt találtak fel.

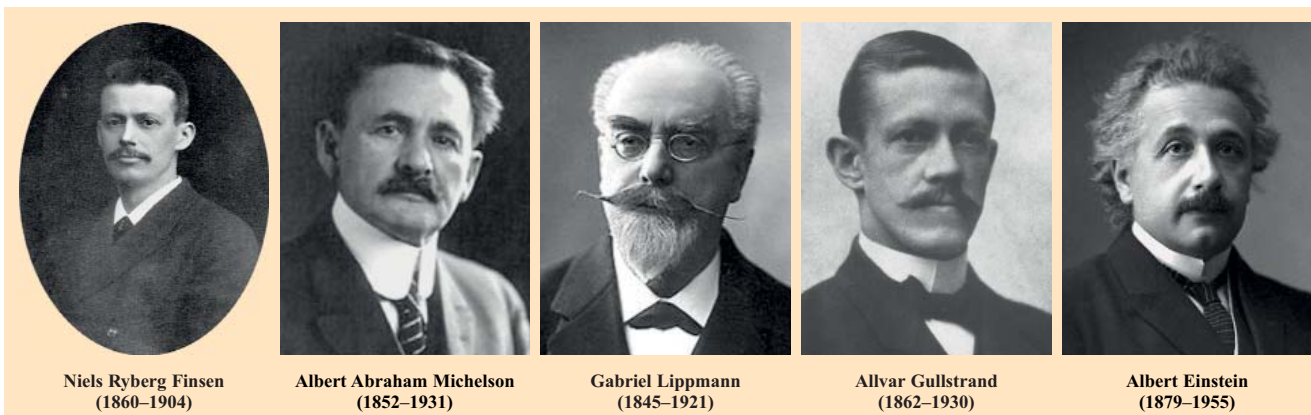
Albert Abraham Michelson (1852–1931) német származású amerikai fizikus „pontos optikai berendezéséért, és az ezzel végzett spektroszkópiai és meteorológiai kutatásaiért” kapta meg a díjat. A Michelson-interferométer volt az az eszköz, mellyel a látható fényvel végzett kísérletek során sikerült feltárni az éterelmélet tartathatlanságát, továbbá a fizika egyik alapelvét tenni a vákuumbeli fénysebesség állandóságának elvét. Mégsem ezt tartották a legfontosabbnak a Nobel-díj odaítélésekor, hanem magát a pontos méréseket lehetővé tevő eszközt.

A fény sebességének mérése kezdettől fogva izgatta az Egyesült Államok Tengerészeti Akadémiáját végzett, majd ott oktató Michelson. Már 26 éves korában pontosította a Fizeau módszerével addig elért mérési eredményeket, és még nem volt harminc éves, amikor németországi tanulmányútján Helmholtz laborjában megépítette első interferométerét. Ezt tovább tökéletesítve, végül 1887-ben E.W.Morley-val közösen jutottak arra a meglepő kísérleti eredményre, amit csak Einstein tudott helyesen értelmezni a speciális relativitáselmélet felállításával. 1887 után húsz évvel kapta meg Michelson a fizikai Nobel-díjat. Akkor már 15 éve ő volt a Chicagói Egyetem Fizikai Intézetének vezetője.

1908. A színek varázsa

A fényképezés gyakorlata a XIX. század végére a dagerrotípiától az első mozgófilm létrejöttéig fejlődött. A századfordulón már világosan látszott, hogy a színes fényképezés irányában kellene továbblépni. De hogyan?

Gabriel Lippmann (1845–1921) francia fizikus kapta a Michelsonét követő évben a fizikai Nobel-díjat „az interferencia jelenségén alapuló színes fényképezési módszeréért”. Nagy reményeket fűzött Lippmann módszeréhez a Svéd Királyi Tudományos Aka-



démia, de a gyakorlat nem váltotta be ezeket a reményeket, más kémiai eljárással alakult ki és terjedt el viharos gyorsasággal a színes fényképezés technikája.

Fél évszázaddal később viszont volt egy fizikus, a Szocsiban született J. Ny. Gyenyiszjuk (1927–2006), aki kezdetleges színes hologramokat készített Lippmann módszerével Leningrádban. Mivel lézer még nem állt rendelkezésére, csak azt tudta megmutatni, hogy a monokromatikus (egyszínű, például kék) fénnel készített hologram a fehér fénnel történő megvilágításkor ebben a (kék) színben jeleníti meg a tárgy holografikus képét. Mind Lippmann, mind Gyenyiszjuk eljárásáról Gábor Génes is megemlékezett 1971-ben tartott Nobel előadásában.

1911. Hazaadott labda

Nobel végrendeletében leszögezte: „Kifejezett akaratom, hogy a díjak odaítélésében a nemzetiség kérdése fel ne merüljön, így tehát a díjat a legméltóbb nyerje el, akár skandináv az, akár nem.”. A Svéd Karolinska Intézet először ebben az évben ítélte a díjat svéd tudósra.

Allvar Gullstrand (1862–1930) szemorvos „a szem optikai rendszerével kapcsolatos munkájáért” részesült az orvosi, fiziológiai Nobel-díjban.

A szemnek mint speciális geometriai optikai rendszernek a tulajdonságait kutatta mind elméleti, mind gyakorlati téren. Már doktori disszertációjában is a szem asztigmatizmusának elméletét dolgozta ki, később pedig több fontos szemészeti vizsgálati eszközt talált fel. Tökéletesítette a Helmholtz-féle szemtükrözési módszert. Hazájában nemcsak a fiziológia, hanem a fizika szaktekintélyének is számított. 1911-től tagja, 1923-tól 1929-ig elnöke volt a fizikai Nobel-díjat javasoló akadémiai bizottságnak. Ilyen minőségében megrögzött ellenzője volt Einstein Nobel-díjjal való kiüntetésének, hiába terjesztették fel a híres tudóst szinte minden évben a relativitáselmélet kidolgozásáért.

1921. Késleltetett döntés

Ebben az évben már két okot is felhoztak a fizikusok Einstein Nobel-díjra való felterjesztésére. Egyik a speciális és általános relativitás elméletének, másik a fotoeffektus elméletének a felállítás volt. Az első téma előzetes értékelésére Gullstrandot, az utóbbi értékelésére Arrheniust kérte fel a Svéd Királyi Tudományos Akadémia. Mindketten negatív értékelést adtak, ezért az 1921-es Nobel-díj kiadását késleltette az Akadémia. Csak 1922-ben, amikor újra nekifutottak az ügynek és további szakértőket kértek fel az értékelésre, akkor ment át, de akkor is csak a második téma, és ebben az évben egyszerre két fizikai Nobel-díjat adtak ki: az 1921-es Albert Einstein, az 1922-es Niels Bohr kapta meg.

Albert Einstein (1879–1955) „érdemdús matematikai-fizikai kutatásaiért, különös tekintettel a fényelektromos hatás törvényének felfedezésére” kapta meg a fizikai Nobel-díjat.

A Nobel-díj várományos Einstein eredetileg Zürichben, az ETH-n szerzett matematika-fizika szakos tanári diplomát 21 éves korában. Tanári állást nem talált, szabadalmi hivatali tisztviselőként publikálta 1905-ben négy meghatározó jelentőségű tanulmányát a legnagyobb német fizikai folyóiratban, az *Annalen der Physik*-ben. A fényelektromos hatás kvantumelmélete, a Brown-mozgás statisztikus elmélete, a speciális relativitáselmélet és a tömeg-energia ekvivalencia elve ma már elválaszthatatlan részei a modern fizikának.

A Nobel-díjat elnyert Einstein viszont 1933-ban kénytelen volt elhagyni a náci Németországot és Princetonban fogadott el professzori állást. 1939-ben küldte el Rooseveltnak azt a levelet, amelynek nyomán jött létre a Manhattan-terv. A második világháborút követő években Einstein az általános relativitáselmélet továbbfejlesztésén, egységes térelmélet kiépítésén dolgozott. Politikailag az 1930-as évek eleje óta szorgalmazta Izrael állam megalakítását, de amikor az 1948-ban valóban megalakult, és 1952-ben felkérték, hogy vállalja el az államelnöki tiszteletet, a felkérést nem fogadta el, inkább megmaradt a tudósi pályán.

1923. Még egy érdekes indokolás

Einstein Nobel-díjának odaítélésében nagy szerepet játszottak egy amerikai kísérleti fizikusnak a fényelektromos hatás Einstein-féle elméletét – s ez által közvetve a foton hipotézist – alátámasztó nagy pontosságú mérései. Mégis csak 1923-ban került sor arra, hogy ez a fizikus is Nobel-díjat kapjon.

Robert Andrews Millikan (1868–1953) „az elektromosság elemi töltésére és a fényelektromos hatásra vonatkozó munkájáért” kapta meg a díjat.

Millikan Amerikában született, de Európában, a berlini és a göttingeni egyetemen tanult, majd a chicagói egyetem munkatársa lett. Itt végezte 1909-ben híres olajcsepp-kísérletét, amellyel meghatározta az elemi elektromos töltés nagyságát. Kérdéznénk, miért nem kapta meg Millikan a Nobel-díjat egyedül az elemi töltés meghatározásáért, amely annyira fontos része a fizikának, hogy ma már a középiskolában is tananyag. A válasz elég érdekes, s erről még az egyetemen is ritkán hallanak a hallgatók. Volt ugyanis Bécsben az egyetemen egy másik kísérleti fizikus, nevezetesen Felix Ehrenhaft (1879–1952), aki a fotofórezis jelenségek vizsgálata során azt találta, hogy létezik kisebb töltés is annál, mint amit Millikan megfigyelt. A Nobel-bizottságban Arrhenius határozottan kiállt Millikan méréseinek megbízhatósága mellett, mégse sikerült a többiekkel meggyőznie. Csak miután Manne Siegbahn (1886–1978) svéd fizikus is tagja lett az ötös bizottságnak (ő emelte ki, hogy Millikannek a fényelektromos hatásra végzett méréseivel a Planck-állandó értékét sikerült a Planckétól különböző úton meg-



Robert Andrews Millikan
(1868–1953)



Richard Adolf Zsigmondy
(1865–1929)



Sir Chandrasekhara Venkata
Raman (1888–1970)



Frits Zernike
(1888–1966)



Alfred Kastler
(1902–1984)

határozni), akkor döntött úgy a bizottság, hogy javasolja Millikan kitüntetését. Ez történt 1923-ban.

1925. Mikroszkóp először: az ultramikroszkóp

Az ultramikroszkóp, amellyel Ehrenhaft is dolgozott Bécsben, két kutató közös találmánya volt. Egyikük egy jénai fizikus, bizonyos Henry Siedentopf (1872–1940), aki a Zeiss Művek kutatója volt, másikuk pedig egy vegyész, aki a XX. század első éveiben ugyancsak Jénában kutatót, saját magánlaboratóriumában. Ez utóbbi tudós kapta meg két évtizeddel később – 1926-ban – az 1925-ös kémiai Nobel-díjat.

Richard Adolf Zsigmondy (1865–1929) „a kolloid oldatok heterogén természetének magyarázatáért, és a kutatásai közben alkalmazott módszerekért, amelyek a modern kolloidkémiaiban alapvető jelentőségűek” – részesült a díjban. Neve után magyarnak tűnik, sokszor be is sorolják a magyar Nobel-díjasok közé, azonban ő osztrák volt. Bécsben született, egy ottani fogorvos fiaként, és valószínűleg sosem járt Magyarországon. Bécsben és Münchenben végezte egyetemi tanulmányait, majd Berlinben, Grazban, Jénában kutatót, végül göttingeni vegyészprofesszorként nyerte el a Nobel-díjat. A kolloidkémia egyik megalapítóját tisztelhetjük benne. A Tyndall-jelenségen alapuló, a kolloid részecskéken szóródó fényt érzékelő ultramikroszkóp feltalálásáért van helye a fény Nobel-díjasai között.

1930. A fény indiai Nobel-díjasa

Nem csak a vegyészeket izgatta a fény szóródása. Minden átlátszó test szórja a rajta áthaladó fényt, de a diffúz szórt fény erőssége és polarizációs állapota anyagonként változik. Ennek alapos vizsgálatalát jutott egy indiai tudós több olyan felismeréshez, melyet csak a fény kvantumtulajdonságával lehetett értelmezni.

Sir Chandrasekhara Venkata Raman (1888–1970) a fizikai Nobel-díjat „a fény szóródásával kapcsolatos munkásságáért és a róla elnevezett hatás felfedezéséért” kapta. A Raman-hatás a röntgensugárzásnál megfigyelhető Compton-hatás megfelelője látható fényre.

Az anyag molekulái által szórt fény frekvenciája azért lesz más, mint a bejövő fényé, mert a foton energiája megváltozhat a molekulával való ütközés során. Erre alapozva fejlődött ki a ma már széles körben használt „Raman-spektroszkópia”.

1953. Mikroszkóp másodsor: a fáziskontraszt mikroszkóp

A 30-as években, amikor a Nobel-díjas Arrhenius és Gullstrand sem lehetett már a fizikai Nobel-bizottság tagja, az ugyancsak No-

bel-díjjal kitüntetett Manne Siegbahn volt a bizottság elnöke, meghatározó egyénisége. Ettől kezdve egyre több elméleti kutató kapott fizikai Nobel-díjat, jelezve az elméleti kutatások súlyának növekedését – főleg a kvantumfizikai témák előretörését – nemcsak a tudományban, hanem a fizikai Nobel-bizottság értékelési felfogásában is. Siegbahn, aki akárcsak Arrhenius, sok-sok turnuson át volt a bizottság elnöke, törekvéseiben megértő támogatásra lelt Carl Wilhelm Oseen (1879–1944) svéd elméleti fizikusban, aki pedig, akárcsak Arrhenius, haláláig maradt a bizottság tagja.

Frits Zernike (1888–1966) holland fizikus nem a legmodernebb, kvantumfizikai irányzatot követte. XIX. századi optikai kutatók (Abbe, Seidel) eredményeiből kiindulva a 30-as évek elején fedezte fel az optikai fáziskontraszt hatást, amelynek alapján megépítette fáziskontraszt mikroszkópját. Két évtized elteltével kapta meg érte a jól megérdemelt fizikai Nobel-díjat. Zernike mikroszkópjával az átlátszó közegekben lévő törésmutató változásokat tudta észlelhetővé tenni az objektív hátsó fókusz síkjában elhelyezett fáziskésleltető lemez segítségével. Ezáltal először vált lehetővé az élő sejtek belső szerkezetének mikroszkópos vizsgálata, minthogy nem kellett a sejteket roncsoló festési eljárásokat alkalmazni. Semmi kétség, Zernike is joggal tekinthető a fény Nobel-díjasának.

Az 1958-as fizikai Nobel-díjas Cserenkov, Frank és Tamm munkásságát, valamint az 1964-es fizikai Nobel-díjat elnyert Townes, Baszov és Prohorov munkásságát Abonyi Iván tárgyalta tanulmányában.

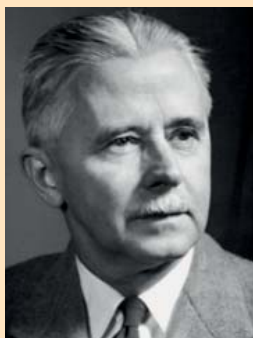
1966. Tudós tanár Párizsból

A párizsi École Normale Supérieure az a francia oktatási-kutatói intézmény, amely mintául szolgált Eötvös Loránd számára az Eötvös Collegium alapításakor. Az intézmény egykor volt tanárai között számos Nobel-díjast találunk. A fény Nobel-díjasai közül is akad közöttük kettő. Egyikük a lézer működéséhez nélkülözhetetlen alapelvet találta fel.

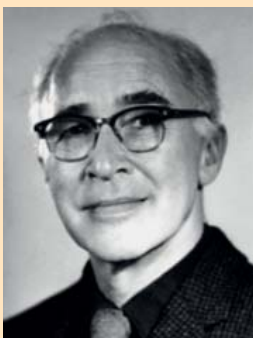
Alfred Kastler (1902–1984) „az atomok elektromágneses rezonanciáinak tanulmányozására szolgáló optikai eljárások felfedezéséért és kifejlesztéséért” kapta meg a fizikai Nobel-díjat. A módszer, amit feltalált 1950-ben, az optikai szivattyúzás vagy pumpálás módszere, azt eredményezi, hogy az atomok az alapszintnél magasabb energiaszintű állapotba hozhatók és tartósan ott tarthatók. Így jöhet létre az energiaszintek fordított betöltöttsége, az ún. inverz populáció. Ebből az alapelvből kiindulva sikerült a mérnök-fizikusoknak megépíteniük a rádióhullámokat kibocsátó első mézereket, majd a fényhullámokat kibocsátó első lézereket. Kastler nemcsak jó feltaláló, de jó tanár is volt. 1941-től az École Normale Supérieure tanáraként egész fizikusnemzedéket nevelt fel Párizsban.



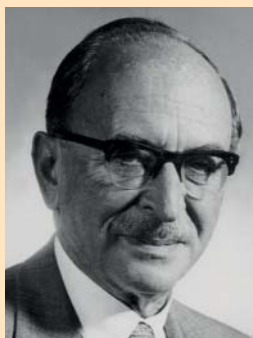
Ragnar Granit
(1900–1991)



Haldan Keffer Hartline
(1903–1983)



George Wald
(1906–1997)



Gábor Dénes
(1900–1979)



Nicolaas Bloembergen
(1920–)

1967. A látás avatott kutatói

Az emberi és állati fényérzékelés biofizikai és biokémiai folyamatainak kutatása is elkezdődött már a 30-as években. Mégis, csak a 60-as évekre gyűlt össze annyi meggyőző kísérleti adat és elméleti eredmény, hogy ki lehetett adni az orvosi-fiziológiai Nobel-díjat – mindjárt három, akkor már a hatvanas éveiket taposó kutatónak, „a látás elsődleges retinális vegyi és élettani folyamatának tanulmányozása terén elért eredményeikért”.

Ragnar Arthur Granit (1900–1991) finn származású svéd fiziológus már a doktori disszertációját is a színlátásról írta. Angol, majd amerikai egyetemeken végzett ösztöndíjas kutatások után Helsinkiben, 1941-től pedig a stockholmi Karolinska Intézetben lett professzor.

Mikroelektrodos technikát alkalmazott az állatok látóidegében a fény hatására keletkező akciós potenciálok mérésére. Megállapította, hogy a retinában a csapoknak és a hozzájuk tartozó neuronoknak két rendszere különíthető el egymástól: az egyik fajta neuron az őt ért fény hullámhosszától függetlenül jelez, a másik rendszerhez tartozó neuronok viszont csak bizonyos hullámhossz tartományokra érzékenyek, ezek felelnek a színlátásért. Érdemes megemlíteni, hogy mivel ő maga is részt vett az orvosi-fiziológiai Nobel-bizottságban, csak 1967-es visszavonulása után fogadta el jelölését a Nobel-díjra.

Haldan Keffer Hartline (1903–1983) amerikai biofizikus több mint negyven éven keresztül foglalkozott a látás élettani folyamataival. Többek között egy rákfajta szemének kísérleti tanulmányozása során állapította meg, hogy az állat szemében kétféle érzősejtek működnek: egyesek csak az őket ért fény hatására, mások a fényinger megszűnésekor jeleznek. Pontszerű fényinger esetén az ingerelt sejt pozitív jelet, közvetlen környezet pedig negatív jelet küld tovább, ezzel növelve a látás élességét.

Hartline 1949-től volt a Johns Hopkins Egyetemen a biofizika professzora. Itteni tanítványa, Paul Greengard (1925–) 2000-ben ugyancsak Nobel-díjat kapott a neurotranszmitterekkel kapcsolatos kutatásaiért.

George Wald (1906–1997) amerikai neurobiológus és biokémikus is – akárcsak Hartline – amerikai egyetemeken szerzett diplomát, majd európai egyetemeken szerzett kutatási tapasztalatokat. 1948-ban lett a Harvard Egyetemen a biológia professzora.

Wald bizonyította be a retina pálcikáiban az A vitamin jelenlétét, s megállapította a látásban játszott szerepét is. Ő mutatta ki a csapok fényérzékeny pigmentjét, a „jodopszint” a csirke retinájában. Kiderítette, hogy a jodopszin fényelnyelésének hullámhosszfüggése nagyon hasonlít az emberi szem fényérzékenységeének hullámhosszfüggésére. Kísérletei több esetben is alátámasztották a csapokban és pálcikákban zajló biokémiai folyamatok molekuláris magyarázatát.

1971. A holográfia feltalálója

Gyakran előfordul, hogy egy-egy jelentős találmány vagy felfedezés megszületése után évtizedekkel kap valaki Nobel-díjat. Így történt ez ebben az évben is.

Gábor Dénes (Dennis Gabor) (1900–1979) magyar származású angol elektromérnök „a holográfiai módszer felfedezéséért és fejlesztéséhez való hozzájárulásáért” nyerte el az akkor már legnagyobb tudományos elismerésként számon tartott díjat.

Még a „holográfia” szót is ő vezette be a tudományba, hangsúlyozandó, hogy teljes (görögül: holo-) leképezésről van szó; a tárgyról jövő fényhullám amplitúdóján kívül a fázisáról is számot ad ez a leképezés. Így lehet a kép igazán térbeli, szinte „körüljárható”, akárcsak egy szobor.

Műegyetemi tanulmányait Budapesten kezdte el, s végül Berlinben fejezte be. Doktori disszertációját a katódsugár-oszcillográf érzékenységet növelő találmányára alapozta, majd a Siemens & Halske cégnél és itthon az Egyesült Izzónál látott el kutatói, fejlesztői, tanácsadói feladatokat. A harmincas évek második felében már Angliában dolgozott a plazmalámpán, a lapos képernyőjű televízión, a 3D-s mozi kifejlesztésén, a háború alatt az Anglia fölé berepülő ellenséges gépek felderítésén, a háború után pedig az elektronmikroszkóp leképezésének javításán. Ennek során ismerte fel a holográfia elvét, amit látható fényre csak a lézerek kifejlesztése után lehetett eredményesen alkalmazni. Nemcsak számos új találmányt szabadalmaztatott, hanem alapító tagként vett részt az emberiség jövőjéért aggó Római Klub munkájában is. „A jövő feltalálása” c. könyve 1963-ban jelent meg. 1964-től volt a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagja.

1981. Lézerspektroszkópia és látósejt-kutatás

Ebben az évben öt olyan kitüntetett is volt, akik a fényvel kapcsolatos munkáikért kaptak Nobel-díjat.

Nicolaas Bloembergen, az 1920-ban született, holland származású amerikai fizikus „a lézerspektroszkópia kifejlesztéséért” részesült az elismerésben. Utrechtben kezdett egyetemre járni, de a második világháború elűldözte hazájából, s az egyetemet a Harvardon fejezte be. Itteni alkalmazott fizikusként tökéletesítette Charles Townes (1915–2015) lézert, majd közös kutatásba fogott Townes sógorával, akivel együtt kapták meg azután a Nobel-díjat.

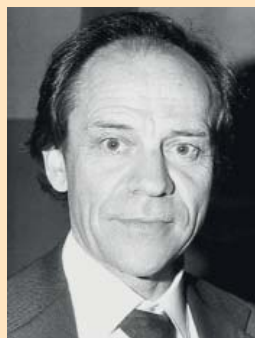
Arthur Leonard Schawlow (1921–1999) édesapja Lettországból emigrált az Egyesült Államokba, ő már New Yorkban született. Townes-szal a Columbia Egyetemen ismerkedett meg poszt-doktori kurzuson, 1951-ben vette el a hűgát feleségül. Bloembergennel közös kutatásuk legnagyobb értéke, melyet a Nobel-bizottság díjazott, az volt, hogy az anyag olyan tulajdonságait vizsgálták, amelyek lézer nélkül elérhetetlenek voltak.



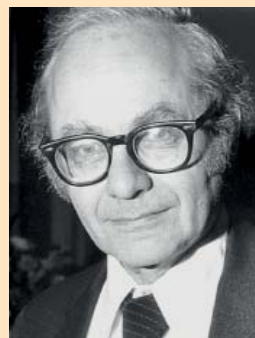
Arthur Leonard Schawlow
(1921–1999)



Kai M. Siegbahn
(1918–2007)



Torsten Nils Wiesel
(1924–)



David Hunter Hubel
(1926–2013)



Ernst Ruska
(1906–1988)

Harmadik társuk, akivel még osztoztak a díjon, Manne Siegbahn fia volt.

Kai Siegbahn (1918–2007) Lundban született. Nehéz időkben, 1944-ben doktorált Stockholmban. Kezdetül fogva spektroszkópiai kutatásokkal foglalkozott, míg végül megtalálta saját igazi témáját. A kémikusok számára fejlesztett ki egy nagy felbontású, érzékeny anyagvizsgáló módszert, amit ma fotóelektron spektroszkópiának hívnak. A 70-es évektől kezdve széles körben használják ezt a módszert a légszennyezés analizisétől kezdve az olajfinomítókban használatos katalizátorok vizsgálatáig. 1954-ben lett az uppsalai egyetem professzora, itt dolgozott halála napjáig. A kételkedők megnyugtatójának: a fizikai Nobel-bizottságnak apját követően lett tagja, de 1974-ben befejezte ezt a munkát. Az 1981-es Nobel-díjasok kiválasztásába már nem szólhatott bele.

Ugyanakkor nemcsak a fizikai, hanem az orvosi-fiziológiai Nobel-díjat javasoló bizottság is talált két olyan kutatót, akik joggal tekinthetők ma már a fény Nobel-díjasainak, mert a díjat „a látási rendszer információ-feldolgozó működésének felfedezéséért” kapták.

Torsten Nils Wiesel, az 1924-ben született svéd orvos, neurológus ma is él, akárcsak Bloembergen, túl 90. évén. Számos nemzetközi tudományos szervezet és tanácsadó testület tagja, elnöke, többet ő maga alapított. Tiszteleti tagja a Magyar Tudományos Akadémiának is. A Nobel-díjat megelőzően 21 éves korától fogva élt és dolgozott az Egyesült Államokban, különböző egyetemeken.

David Hunter Hubel (1926–2013) amerikai neurológus kísérleti fizikusnak is kiváló lehetett volna. Saját tervezésű, hidraulikusan vezérelt mikroelektrodokkal tudott vizsgálni egyes különálló idegsejteket.

Wiesel és Hubel 1958-tól kutatták közösen azt a látási mechanizmust, amely a szembe jutó fényinformációt az agyi látókéregbe közvetíti. Első közös ötletük mindjárt ismertté tette nevüket a szakmában: újszülött macskák egyik szemét tartósan letakarva, majd három hónap múlva a takarást megszüntetve kiderítették, hogy az állatok erre a szemükre azért nem látnak, mert fényingerek hiányában nem fejlődött ki a szem és az agyi látásközpont közötti idegi kapcsolat, nem alakultak ki a megfelelő idegsejtek, neuronok. További több mint két évtizedes, sok kreatív ötletet megvalósító, rendkívül következetes kísérletezés eredménye lett az orvosi-fiziológiai Nobel-díj. Ma őket tekintik az egysejtes vizsgálatok úttörőinek.

1986. Mikroszkóp harmadszor: elektron- és atomerő-mikroszkóp

1925-ben és 1953-ban is adtak Nobel-díjat egy-egy új típusú, de látható fényvel működő mikroszkóp feltalálásáért. Ugyanakkor világossá vált, hogy a mikroszkóp felbontó képességét úgy lehet tovább növelni, ha fényhullámok helyett elektronhullámokkal próbáljuk meg leképezni a kicsiny részleteket, s csak ezután alakítjuk át az elektronok által létrehozott képet fényhullámok alkotta képé az emberi szem számára. Ez lett az elektronmikroszkóp, amelynek fejlesztésén Gábor Dénes is dolgozott sok más kutatóval párhuzamosan, de amelyért azt a kutatót tüntették ki fizikai Nobel-díjjal, immár 80 éves korában, aki nemcsak első között volt az elektronmikroszkóp feltalálói sorában, de egész életét ennek az eszköznek a fejlesztésére fordította.

Ernst August Friedrich Ruska (1906–1988) német fizikus „az elektronoptikában végzett munkájáért” kapta a díjat, „különös tekintettel az első elektronmikroszkóp megtervezésére”.

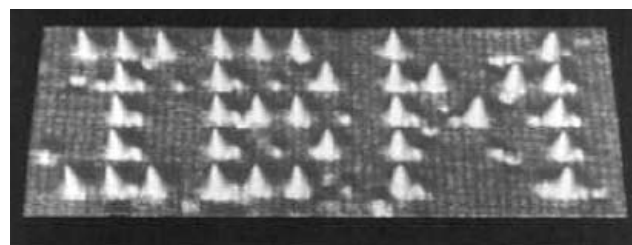
Ruska 1925-től 1927-ig a müncheni, azután a berlini műegyetem hallgatója volt. A Siemens AG kutatómérnökeként dolgozott 1937-től 1955-ig, utána a Fritz Haber intézet elektronmikroszkópos részlegének igazgatója, emellett a berlini műegyetem professzora lett és maradt 1972-es nyugdíjba vonulásáig.

Nem egyedül kapta meg a díjat, pontosabban a Nobel-díj felét, a másik felét ugyanis megosztva kapta két másik kutató, „a pásztázó alagútmikroszkóp feltalálásáért”.

Heinrich Rohrer (1933–2013) svájci kutató Zürichben az ETH-n, a zürichi műegyetemen végzett 1951-ben, Wolfgang Pauli (1900–1958) és Paul Scherrer (1890–1969) tanítványa volt. Doktori munkájáért szupravezetőkben fellépő kicsiny hosszváltozásokat kellett mérnie – már ekkor megismerkedett a mérésgeilkos vibráció problémájával. 1963-ban kezdett dolgozni az IBM zürichi laboratóriumában, ahol többek között antiferromágnességgel és kritikus jelenségekkel foglalkozott 1978-ig, egy új, fiatal munkatárs belépéséig. 1982-től ők ketten együtt dolgoztak a pásztázó alagút-mikroszkóp megépítésén, együtt lettek Nobel-díjasok.

Gerd Binnig (1947–) sokáig a zenei és a fizikusi pálya között ingadozott; szépen hegedült és beategyüttesekben gitározott. Saját bevallása szerint egyetemi tanulmányai sem hagytak mély nyomot benne, csak azt élvezte igazán, amikor diplomamunkáján dolgozott. 31 évesen, doktorijának megvédése után lépett be az IBM laboratóriumába, ahol kedvező munkahelyi légkörre talált és kellemes barátra lelt Heinrich Rohrer személyében. Közös munkájuk eredménye, amit ők pásztázó alagútmikroszkópnak (Scanning Tunneling Microscope) neveztek.

IBM felirat 35 xenonatómból, atomerő-mikroszkóppal felvéve





Gerd Binnig
(1947–)



Heinrich Rohrer
(1933–2013)



Steven Chu
(1948–)



Claude Cohen-Tannoudji
(1933–)



William D. Phillips
(1948–)

neling Microscope) neveztek el, méreteit tekintve nem nagy (elférne akár melyik feltaláló tenyerén), számítógépekkel összekapcsolt működését, teljesítményét tekintve viszont villámgyorsan kivívta a szakértők elismerését.

Binnigék ahhoz is értettek, hogyan szemléltessék találmányuk teljesítőképességét: tüzsondjuk segítségével 35 xenonatómból kirakták az IBM betűket egy atomsíkra, majd ezt lefényképezték és publikálták.

1997. Lézerekkel lassított és csapdába ejtett atomok

A „lézeres atomhűtés” az egyik legmeglepőbb eredménye a lézerekkel, e különleges fényforrásokkal végzett kutatásoknak. A már az abszolút zérus fok közelébe lehűlt atomokat még tovább lehet hűteni (lassítani) azzal, hogy lézerekből jövő, megfelelő frekvenciájú fénnyel világítjuk meg őket! Azt váránk, hogy egy gáz, amely fotonokat nyel el a térből, felmelegszik. Hogyan lehet fénnyel hőt elvonni a gázból? Akik ezt megvalósították, jogosan nyerték el a Nobel-díjat.

Steven Chu 1948-as születésű amerikai fizikus a Berkeley-ben megszerzett PhD fokozatát felmutatva kezdett dolgozni a Bell Laboratóriumban a 70-es évek végén. Az alatt az évtized alatt, amelyet ezután itt töltött, sikeresen ötlötte ki és valósította meg az atomok „csapdázását” lézerek segítségével, amelynek következményeként adódott a csapdába zárt atomok lehűlése. Hogyan? Az atomok kvantumfizikai tulajdonsága, hogy csak meghatározott frekvenciájú fotonokat tudnak elnyelni. Ha ennél valamivel kisebb frekvenciájú fénnyel világítjuk meg a gázt, akkor azok az atomok, melyek éppen a fényforrás felé haladnak, a Doppler-effektus felélépe miatt képesek lesznek felvenni a fotonokat. Amikor ezek a sikeresen gerjesztett atomok kibocsátják a felvett energiát, ezt már az ő saját frekvenciájukon teszik, amely nagyobb, mint a lézer frekvenciája, tehát végeredményben ezek az atomok veszítenek az energiájukból – ezért lassulnak le. Chu hat lézert állított fel, kettőt-kettőt egymással szemben a tér három (x, y, z) irányából, s ezekkel világította meg a köztük elhelyezett gázt. Az atomok „csapdába estek”, lelassultak. Az egész anyag olyan lett, mint valami nagy viszkozitású folyadék, el is nevezte „optikai melasz-nak”. Lehetővé vált a csaknem megállított atomok egyéni megfigyelése, s még az atomórák pontosságát is növelni lehetett...

Claude Cohen-Tannoudji Algériában született 1933-ban. Algírban szerzett francia érettségivel vették fel az École Normale Supérieure hallgatói közé Párizsban, ahol többek között Alfred Kastler lett a tanára. Tanulmányait két éves katonaszkola szakította meg az algériai háborúban. Végül csak 1962-ben sikerült doktorálnia, utána azonban villám gyorsan haladt előre a kutató fizikusi pályán. Az École Normale Supérieure célszerűen kialakított laboratóriumában sikeresen csapdázta és lassította le az atomokat, és tovább finomította a jelenség Chu által adott magyarázatát.

William Daniel Phillips is 1948-as születésű amerikai fizikus, akár csak Chu. Ő azonban nem Berkeley-ben, hanem Massachusettsben szerzett PhD fokozatot, s abban a kutatóintézetben helyezkedett el, amelynek elődjében Bay Zoltán is dolgozott 1948-tól nyugdíjazásáig. Phillips az optikai melaszból kiszökő atomok sebességét mérte nagy pontossággal, s az elmélettől való eltérést is sikerült megmagyaráznia az általa bevezetett Zeeman lassítás elvének felhasználásával. Egy érdekesség vele kapcsolatban: ugyanolyan meggyőződéses híve lett a vallás és a tudomány közötti párbeszédnek, mint az 1981-es Nobel-díjas A. L. Schawlow volt.

2009. Későn jött Nobel-díjak

1997 után több mint egy évtizedet kellett várni, mire újra a fény-nyel kapcsolatos kutatásokért ítélték valakinek Nobel-díjat. A díj felét egy kínai születésű angol-amerikai villamosmérnök kapta, a díj másik felén pedig egy kanadai-amerikai és egy született amerikai fizikus osztozott. Ami elgondolkodtató: mindhárman már negyven éve feltalálták azt, amiért ekkor a kitüntetett díjban részesültek.

Charles Kuen Kao 76 éves volt 2009-ben. Kínában, Sanghajban született, 15 éves korában költözött a családdal Hongkongba, s lett angol állampolgár. Londonban szerzett elektromérnöki PhD-fokozatot 32 éves korában, miközben már az angol telefontársaság kutatóközpontjában dolgozott. Az optikai szálakban terjedő fényjel rendkívül nagy csillapodását mérte és ennek okait kutatta. Ha ezt az erős csillapodást megfelelő minőségű és vastagságú üvegszálat használva nagyságrendekkel lehetne csökkenteni, akkor a rádióhullámok helyett fényhullámok modulálásával lehetne a fény sokkal nagyobb frekvenciáját kihasználva sokkal több információt közvetíteni – ez volt Kao nagy ötlete. Üvegszálas optikai kábelrel váltani ki a rézkábeleket! Kao nemcsak jó kutató, hanem jó kutatásszervező is volt: kémiai kutatóintézeteket is bevont a kutatásba és még japán támogatást is sikerült szereznie. 1969-re a kezdetben 100dB/km-es csillapodást 4dB/km-esre sikerült csökkenteni, s ekkor az egész világon megindult az optikai kábelek iránti érdeklődés, lázas kutatás. A Földet behálózó optikai kábel-lek hossza ma már meghaladja az 1 milliárd kilométert; Kao lett „a száloptikai kommunikáció apja.” A sikeres kutatói és egyetemi tanári karrier azonban szomorúan zárult: a kiérdemelt Nobel-díjjal járó összeget jelenleg a már 2004 óta Alzheimer-kórban szenvedő tudós gyógyítására fordítják...

A Nobel-díj másik felét a Bell Laboratórium két fizikusa a CCD (Charge-Coupled Device, töltéscsatolt eszköz) képalkotó szenzor kifejlesztéséért kapta.

Willard Stelling Boyle (1924–2011) 85 éves volt már 2009-ben. 1953-tól volt a Bell Laboratórium kutatója, itt tevékenyen részt vett az első, folyamatosan működő rubin lézer kifejlesztésében. Az Apollo-programban a Holdra szállás helyének kiválasztásában vett



Charles Kuen Kao
(1933–)



Willard S. Boyle
(1924–2011)



George E. Smith
(1930–)



William E. Moerner
(1953–)



Eric Betzig
(1960–)

részt, majd visszatért az integrált áramkörök kutatásához. Legsikeresebb munkája a CCD létrehozása volt 1969-ben, amellyel az elektronikus fényképezés előtt nyitott utat.

George Elwood Smith is 79 éves volt már 2009-ben. 1959-től volt a Bell Laboratórium kutatója, egészen 1986-os nyugdíjazásáig. Számos új lézer és különböző félvezető eszközök feltalálása fűződik a nevéhez, rengeteg szabadalma van. Boyle-lal együtt eredetileg képtelefon előállításán dolgoztak, félvezető buborékmemóriát akartak létrehozni. Ennek fotodiódával kombinált továbbfejlesztése lett az az integrált áramkör, amit CCD-nek neveztek el és hamarosan már a Hubble-űrtávcsőbe is beépítettek.

2014. Mikroszkóp negyedszer: a fluoreszcens mikroszkóp – és a féhéren fénylő fény

Tavaly hattal nőtt a fény Nobel-díjasainak száma.

Hárman kaptak kémiai Nobel-díjat „a szuperfelbontású fluoreszcens mikroszkópia kifejlesztéséért”.

Jól tudjuk: mára már a nanotechnológia lett az „ars nova” (új művészet) a századforduló természettudományában. Eredményei az életfolyamatok vizsgálatában a leglátványosabbak. Élő sejtek vizsgálatánál különösen előnyös, ha elkerülhetők a sejtet roncsoló festési eljárások. Így kaphatott már Zernike is fizikai Nobel-díjat 1953-ban a fáziskontraszt mikroszkóp feltalálásáért, 2014-ben pedig a fluoreszcens mikroszkóp feltalálóiért díjazták a kémikusok.

A díjazott feltalálók sikerült az optikai mikroszkóp felbontó képességét a nanodimenziók világába eljuttatniuk. A „nanoszkópia” tette lehetővé az élő sejteken belül az egyes molekulák nyomon követését. Ez az „egymolekula mikroszkópia” az egyes fluoreszcens molekulák fénykibocsátásának ki- és bekapcsolásán alapul. Ugyanarról a területről készített felvételek sokasága teszi követhetővé a fluoreszcens molekulák mozgását a sejtben.

William Esco Moerner (1953–) amerikai tudós tehetsége és érdeklődése már egyetemista korában is széles körre terjedt ki; végül molekulák lézer-gerjesztett rezgéseiről készítette fizikus PhD dolgozatát. Azután matematikusként dolgozott Kaliforniában, az IBM kutatási központjában, majd kedvelt vendégtanár lett Európa és Amerika legjobb egyetemeinek fizikai kémia és biokémia tanszékein. Egyik posztdoktori hallgatójával közösen dolgozta ki a pásztázó közelmező (közelítér) optikai mikroszkópia (Scanning Near-Field Optical Microscopy; SNOM) elvét és építette meg az első fluoreszcens mikroszkópot. Ennek eredményeként 2008-ban nyerte el a kémiai Wolf-díjat, és 2014-ben lett megosztott kémiai Nobel-díjas.

Eric Betzig (1960–) amerikai fizikus PhD-dolgozatát már a közelmező (közelítér) optikából írta. Az eljárás finomításával vizsgálta az alkalmazás lehetőségeit, többek között a szuperfelbontású fluoreszcens eljárással végzett képalkotást. A fény hullámhossznál kisebb átmérőjű, hegyes optikai szálon kilépő fény a tütől né-

hány nanométerre lévő mintából a hullámhossznál kisebb méretű felületet világít meg. Ebben a fluoreszkáló jelzőanyagok jól követhetővé teszik a vívmolekulák mozgását. Régóta ezen a témán dolgozik, munkássága hazai kutatóintézeinkben, például Debrecenben is jól ismert.

Stefan Walter Hell (1962–) Aradon született német fizikus. Még 15 éves korában, Ceaușescu rendszerének „jövöltábol” került ki családjával Németországba. Ma már Göttingenben, az ottani Max Planck Intézetben a biofizikai kémiai kutatások vezetője, Heidelbergben pedig a német rákkutatási központ optikai nanoszkóp részlegét irányítja, miközben Göttingenben kísérleti fizikát, Heidelbergben elméleti fizikát ad elő az egyetemen. Őt is ismerik a hazai kutatók. Az általa feltalált eljárásban lézerrel gerjesztett – stimulált – fluoreszcens molekulák fényét képezik le, pontról pontra tapogatva le a mintát. Mivel a lézeres, „pontoszerű” megvilágítás helye komputerrel pontosan beállítható és követhető, elérhető az Abbe-féle korlátot jóval meghaladó felbontó képesség.

A kémiai Nobel-díjasok után vessük tekintetünket a fizikai Nobel-díjasokra, nézzük a másik triumvirátust!

„Mehr licht!” – ezek voltak állítólag Goethe utolsó szavai, s ez napjainkban valódi és átvitt értelemben is a művelt emberek vágya, óhajta az egész világon. Ami a valódit illeti, jelenleg a világ villamosenergia-felhasználásának mintegy a negyedét fordítjuk világításra. Hazánk a huszadik század első felében élen járt az izzólámpagyártásban, de még a század közepén is szép eredményeket ért el az Egyesült Izzó a fénycsővek belső falára felvitt fehér fényporok előállításában. Ma már japán és amerikai kutatóké az érdem, hogy sikerült kifejleszteni olyan ragyogó fehér fényt árasztó LED-es lámpákat, amelyek jelenleg a leghosszabb élettartamú és leginkább energiatakarékos fényforrások. Ezek a LED-ek a felvett és hasznosítható elektromos energia mintegy 44%-át alakítják látható fénné – az izzólámpák esetén ez a fényhasznosítási mutató 2–2,5%, kompakt fénycsőveknél is csak 10–12%... Mindenképpen az izzólámpák becsült élettartama ezer óra, a kompakt fénycsővéké 10 ezer óra, a LED-es fényforrásoké 100 ezer óra! Hogyan sikerülhetett ezt elérni?

Régóta ismert, hogy vörös, zöld és kék alapszíneket megfelelő arányban – additíve – keverve, előállítható belőlük a fehér fény. Ha egy fénycsőből jövő fehér fény spektrumát megvizsgáljuk, fel is fedezhetjük benne a jellegzetes vörös, zöld és kék vonalakat. Félvezető diódákból azonban először csak a vörös, később pedig a zöld fényt kibocsátó LED-eket sikerült előállítani, és csak mintegy 20 évvel ezelőtt sikerült olyan fejlett technológiát kidolgozni, amely a „kék LED” előállítását is lehetővé tette. Három türelmes és céltudatos, a magyar anyagtudományi kutatók által is ismert japán kutató érdemelte ki megosztva a 2014. évi fizikai Nobel-díjat „a hatékony, kék fényt kibocsátó diódák felfedezéséért, ami lehetővé tette az energiatakarékos és környezetbarát fényforrás” kifejlesztését. (Munkájuk annyira speciális jellegű, hogy alig lehet beszélni róla speciális szakkifejezések nélkül – előre is elnézést érte!)



Stefan W. Hell
(1962–)



Isamu Akasaki
(1929–)



Hiroshi Amano
(1960–)



Shuji Nakamura
(1954–)



A japán nevek átírásakor itt a kiejtésüket követő magyar írásmódot alkalmazva, s a vezetékneveket a magyarral megegyező japán sorrendben, előre téve:

Akasaki Iszamu (1929–) a Nagojai Egyetemen doktorált 1964-ben, azóta foglalkozik kristálynövesztéssel, több rétegű félvezető szerkezetek tervezésével és előállításával. Különösen a 70-es években megjelent új kristálynövesztési technikák (molekulasugaras epitaxia, fémorganikus lecsapatás) keltették fel a figyelmét, ekkor kezdett hosszadalmas, türelmet próbáló kísérletsorozatba. Szerencsére 1982-től segítségé, társa is akadt a kísérletezésben:

Amano Hiroshi (1960–) Akasaki doktorandusza volt, majd kutatótársa lett a Nagojai Egyetemen. 1986-ra sikerült optikai minőségű GaN réteget előállítani, ez lett a fémorganikus gőzfázisú epitaxiával történő diszlokációmentes GaN növesztés első gyakorlati megoldása. Eközben Japánban másutt is folyt a megfelelő összetételű félvezető szerkezet lázas keresése. Többek között a fényporokat gyártó Nichia vegyipari cégnél, ahol egy tehetséges feltaláló vezette a cég kutatási részlegét:

Nakamura Szudsi (1954–) nemcsak LED-ek fejlesztésében vett részt, hanem számos más találmánya is volt. Neki sikerült meg-

magyaráznia a GaN elektronmikroszkópos vizsgálata során a növesztett kristályokról szerzett meglepő tapasztalatokat. Ezek után mind Akasaki, mind Nakamura csoportjában olyan komplikált heteroszerkezeteket fejlesztettek ki, amelyekben végül sikerült kék-lézer emissziót kimutatni. Nakamura 1999-ben az Egyesült Államokba költözött, amerikai állampolgárként peres eljárásba kezdett, majd peren kívül állapodott meg volt cégével a kék LED kifejlesztésében végzett munkájának utólagos anyagi elismeréséről...

Ma még nehezen felbecsülhető az az óriási megtakarítás, amelyet a kék LED feltalálása eredményezett, s még eredményezni fog „fényben úszó világunk” számára. Amint a díj átadásakor a fizikai Nobel-bizottság elnöke megállapította: ez a díj valóban az alapító szándéka szerinti kitüntetés, hiszen Nobel végrendeletében ez áll: „Tökém évi kamatai azok számára osztassanak fel, akik az elmúlt esztendőben az emberiségnek a legnagyobb hasznot hajtották.”

Az most, e tanulmány írásakor még nyitott kérdés, hogy vajon 2015-ben, a fény évében, lesz-e olyan Nobel-díjjal kitüntetett kutató, aki ezt is túl tudja szárnyalni. ✨

A Fény Éve 2015 alkalmából megjelent kiadványok



PÉCZ BÉLA

Fiat lux

Legyen világosság! – mondta a Nobel-díj Bizottság

Amikor bő 10 éve megjelentek az első igazán jól látható közlekedési lámpák (bennük a LED-ek), nem sejtettük, hogy mindez hova vezet napjainkra, és hogy 2014-ben a fizikai Nobel-díjat a kék LED kifejlesztésért adják. Isamu Akasaki, Hiroshi Amano és Shuji Nakamura a díjazottak, akik közül az első kettő a Nagojai Egyetemen dolgozik, míg Nakamura jelenleg a University of California, Santa Barbara professzora, korábban Japánban a Nichia Chemicals cégnek dolgozott. Talán érdemes megemlíteni, hogy a Nagojai Egyetem ezzel az ötödik és hatodik Nobel-díjat nyerte. Két részecskefizikus (M. Kobayashi és T. Maskawa, 2008 fizikai Nobel-díj) mellett a 2001-ben kémiai Nobel-díjjal jutalmazott R. Noyori és a 2008-as nyertes (szintén kémia) O. Shimomura is ott dolgozik.

A kék LED-ek segítségével (vörös, sárga és zöld diódák már régóta rendelkezésre álltak) lehetővé tették a fehér fénnel való világítás forradalmát – hangzik a díj indoklásában.

Nézzük meg tehát először a hátteret. A LED (Light Emitting Diode) egy félvezető eszköz, amely egy keskeny sávban bocsát ki fényt az infravörstől az ultraibolyáig terjedő tartományban. Ehhez egy úgynevezett direkt tiltott sávú félvezetőre van szükségünk, amiben a vezetési sáv minimuma a vegyértéksáv maximuma felett van. (A vegyértéksávban levő elektronok kötöttek, a vezetési sávban levők szabadon tudnak mozogni.) A félvezetők tiltott sávja néhány elektronnál, ami lehetővé teszi, hogy a vegyértéksávból elektronokat gerjesszünk fel a vezetési sávba, pozitív töltésű lyukakat hagyva a vegyértéksávban. Ha a félvezetőnket olyan atomokkal adalékoljuk, amiknek eggyel több elektronjuk van, mint a félvezetőt alkotó atomoknak (donorok), akkor ezek igen könnyen a vezetési sávba kerülnek, az anyag vezetőképessége nő, ezt n-típusú félvezetőnek hívjuk. Analóg módon az eggyel kevesebb elektront tartalmazó atommal (akceptor) való adalékolt félvezetőben a lyukak koncentrációja nő meg, ez a p-típusú félvezető. Ha egy p és egy n típusú félvezetőből pn átmenetet hozunk



A fizikai Nobel-díj 2014-es díjazottjai:
Isamu Akasaki; Hiroshi Amano, Akasaki
korábbi PhD-diákja; Shuji Nakamura
(Forrás: nobelprize.org)

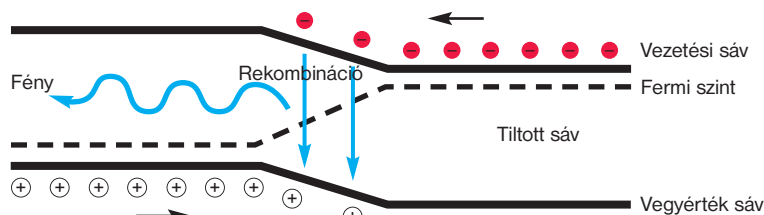
létre (a gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a két anyagot egymásra növesztjük, vagy az egyiket a másik egy tartományában pl. ionimplantációval létrehozuk), akkor amennyiben ez direkt tiltott sávú, akkor az előfeszített p-n átmenetben az elektronok az n oldalról a p-be hatolnak és az átmeneten a lyukakkal rekombinálnak. Miközben az elektronok a vezetési sávból a vegyértéksávba kerülnek, energiájuk a direkt sáv szélességével csökken, amit egy foton formájában sugároznak ki. Ez a LED működésének alapja (**1. ábra**). (Az indirekt sávú félvezetőkben fononok közreműködésére is szükség van az elektron-lyuk rekombinációhoz, ami erősen csökkenti a hatásfokot.)

Könnyen érthető, hogy egy LED által kibocsátott fény színe a félvezető tiltott sáv szélességétől függ. Az $E = hc/\lambda$ képletből (h a Planck állandó, c a fénysebesség) kiszámítható, hogy adott λ hullámhosszú (azaz színű) LED-hez milyen tiltott sáv szélességű félvezetőre van szükségünk.

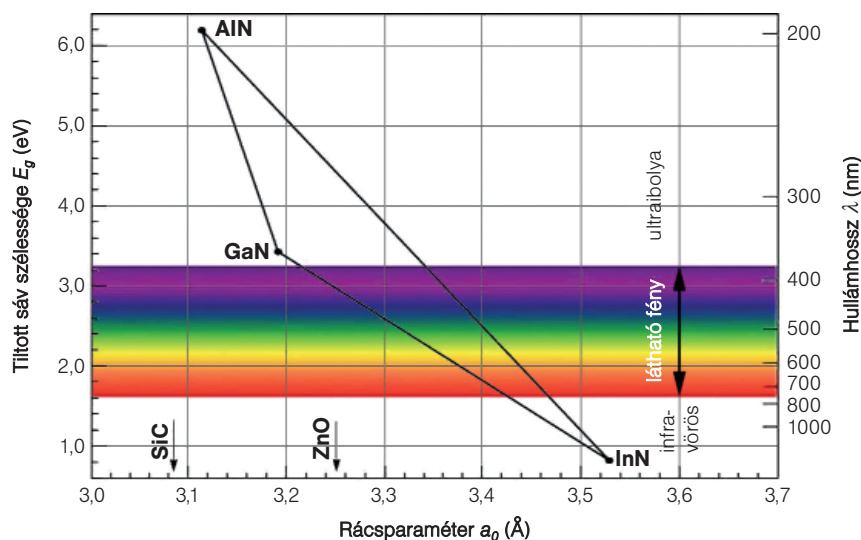
A **2. ábra** mutatja a GaN és rokon anyagai tiltott sáv szélességét. Ez az anyagrendszer azért csodálatos, mert egymással könnyen ötvözhetőek, és így pl. indium ötvöztetésével InGaN rétegekből készíthetünk kék LED-eket. A probléma csak az, hogy ezek az anyagok tömbi formában nem elérhetőek, ezekből készült szkeletok nem állnak rendelkezésre. (A tömbi GaN nagy nyomáson való növesztésében Prof. S. Porowski, Institute of High Pressure Physics, Varsó ért el sikereket. Ezek a minták kis méretük ellenére igen fontosak voltak már a GaN eszközfejlesztések kezdeti periódusában is, hiszen ezeken lehetett kimérni fontos fizikai tulajdonságokat. Bár InN-et ők nem növesztettek, de érdemes itt megemlíteni, hogy sokáig a világ 1,9 eV-nak hitte az InN tiltott sáv szélességét, addig, amíg nem tudtak belőle elegendően tiszta rétegeket növesztetni és kiderült, hogy a helyes érték 0,7 eV. Még 1997-ben Akasaki és Amano is 1,9 eV-os értékről írt összefoglaló cikkükben, Jpn. J. Appl. Phys. 36, 1997, 5393)

Ga-nitrid eszközöket tehát csak úgy lehetett létrehozni, ha egy másik egykristály anyagra növesztjük egykristályosan a GaN-et, u.n. heteroepitaxiával. Ezt az elgondolást is nehezen lehetett megvalósítani, hiszen nem voltak hasonló rácsparaméterű szkeletok sem.

¹ A cikk első megjelenése: Természet Világa, 2015. 2. szám



1. ábra. A LED elvi működésének folyamata. (A Nobel-díj indoklásában a kibocsátott fénycsugár még vörösről volt színezve)



2. ábra. GaN és rokon anyagainak rácsparaméterei, tiltott sáv szélessége és az ebből készíthető LED hullámhossza

Akasaki és Amano MOCVD-vel (Metal-organic Chemical Vapor Deposition) próbált jó minőségű GaN-et növesztetni, azaz magas hőmérsékleten trimethyl gallium és ammónia forrásból kémiai reakcióban választottak le GaN-et általában zafír- (Al_2O_3) szeletekre. (Megjegyzés: a fizikusok a tiszta Al_2O_3 kristályra a zafír megnevezést használják, szemben az ásványtani elnevezéssel, ami korund. A zafír vassal és titánnal szennyezett korund az ásványtan szerint.) A minőség messze elmaradt a várttól, hiszen 15% az eltérés a két anyag rácseltérésében (misfit). Nagy rácseltérés esetén sok hiba keletkezik a növekvő rétegben és igen nehéz azt kétdimenziós növekedésre kényszeríteni, márpedig egy durva felületű félvezető réteg eszközök készítésére alkalmatlan. Ezért maradhatott visszhang nélkül, hogy Maruska és Tietjen (Appl. Phys. Lett. 15, 1969, 327) már 1969-ben növesztettek GaN-det zafír hordozóra. Ugyanakkor igen fontos, hogy már akkor rámutattak arra, hogy a GaN direkt tiltott sávú félvezető és a bandgap szobahőmérsékleten 3,39 eV. Ugyan 1983-ban Yoshida és munkatársai (Appl. Phys. Lett. 42, 1983, 427) már alkalmaztak AlN réteget a zafíron a

GaN növesztése előtt, de a molekulásugaras epitaxiával előállított rétegekben az elektronok mozgékonyasága mindössze 35 cm^2/Vs volt. 1986-ban jött el az áttörés, amikor kétféleképpen növesztést alkalmaztak (Amano és munkatársai, Appl. Phys. Lett. 48, 1986, 353), először viszonylag alacsony hőmérsékleten (500 °C) egy vékony AlN réteget (50 nm) növesztettek, majd megemelve a hőmérsékletet (1000 °C) erre növesztettek vastagabb GaN réteget. Ezzel a tükröző felületű, repedésmentes és jó minőségű GaN rétegek elérhetővé váltak az elektronika és az optoelektronika nagyon sok alkalmazása számára. Nakamura 1991-es cikkében (Japanese J. Appl. Phys. 30, 1991, L1705), arra mutatott rá, hogy amikor GaN-ből növesztik az alacsony hőmérsékleten leválasztott buffert is, akkor az elektron mozgékonyaság jóval meghaladja az Akasaki és Amano által AlN bufferen kapott 350–430 cm^2/Vs értékeket. A növesztési eljárások természetesen tovább finomodtak. Amikor bevezették a zafír nitridálását (a szeletet a növesztés megkezdése előtt rövid ideig 1000 °C-on tartják ammónia áramban) rámutattunk (Pécz és munkatársai J. Appl. Phys., 86 (1999) 6059),

hogy a zafír hordozó és az ammónia közti reakcióban a felületen AlN keletkezik és az azután leválasztott AlN buffer már erre nő.

Ahogy azt a második ábrán bemutattuk, legalább egy p-n átmenetre szükségünk van, tehát meg kellett oldani a GaN adalékolását is, amiben a p-típus kialakítása jelentette a kihívást. Amano és Akasaki fontos megfigyelést írtak le, amikor észrevették, hogy a pásztázó elektronmikroszkópban a Zn-kel adalékolott GaN több fényt emittál. Hasonlóan a kisenergiás elektronokkal besugárzott, Mg-mal adalékolott GaN is jobb p-típusú tulajdonságokat mutatott. Érdekes módon a jelenséget Nakamura és munkatársai magyarázták meg azzal, hogy a Mg és a Zn hidrogénkomplexeit képez, amiket az elektronsugár elbont, és így aktiválja ezeket az akceptorokat. Nakamura azt is megmutatta, hogy egyszerű hőkezeléssel is lehet a Mg-ot aktiválni. A ternér rétegek (InGaN és AlGaIn) növesztését és adalékolását mindkét csoport megoldotta a 90-es évek első felében.

A magas hatásfok eléréséhez kettős heteroszerkezetek, ún. quantum well szerkezetek is kellenek. Az ilyen szerkezetekben az elektronok és a lyukak egy kis térrészbe injektálódnak, ahol a rekombináció magasabb hatásfokkal megy végbe, azaz több fényt keletkezik. Akasaki és Amano AlGaIn/GaN szerkezetekkel kísérleteztek. (Érdekes, hogy ebben a témában közös cikkük van az egyik munkatársunkkal, Radnóczy György Zoltánnal – Physica B 340–342, 2003, 1129.) Nakamura eközben sikeresen alkalmazta az InGaIn/GaN, ill. InGaIn/AlGaIn heteroszerkezeteket, quantum well-eket és multi quantum well szerkezeteket, 1994-ben 2,7%-os kvantum hatásfokról számolt be, ami a korábbi értékekhez képest óriási előrelépés volt, majd nemsokára a 12%-ot érték el (2006-ra 36%-ot). 1995/1996-ra mindkét csapatnak sikerült a bonyolultabb szerkezetet igénylő kék lézert is előállítani. Az első európai kék lézer diódát az OSRAM készítette (physica status solidi 180, 2000, 177) 2000-ben. Ennek az élettartamát később egy nagy EU projektben (EURONIM) sikerült jelentősen növelni, a GaN diszlokáció sűrűségének lecsökkentésével. A kék lézertel a mindenki számára ismerős Blue Ray technológia előtt nyílt meg az út és az információátvitelben nagyon nagy fejlődést jelentett. A díjazottak már ezzel többet tettek, mint ami a díj rövid indoklásában áll.

A Nobel-díj indoklása elsősorban azt emelte ki, hogy a kék LED segítségével elérhetővé vált a LED-es fehér világítás. Ez a gyakorlatban igen ritkán valósul meg a szín keverésével (RGB), mert az a világítástechnikában drága lenne. Ehelyett a kék LED-ek felületét foszforral vonják be, ami a kék fényt fehérre konvertálja számunkra. Ezek ma már megközelítik a 300 lumen/W

fényességet a fénycsövek 70 lumen/W értékeivel szemben (a volfrám izzószárláról már ne is beszéljünk a maga 16 lumen/W értékével és 4%-os hatásfokával). Emellett ezek a fényforrások nemcsak 50% feletti hatásfokkal működnek (wall plug efficiency, az emittált fényteljesítmény és a felvett elektromos teljesítmény hányadosa), hanem élettartamuk közelíti a 100 000 órát. Mindez óriási energia-megtakarítást tesz lehetővé, mert a felhasznált elektromos energia kb. 25%-a világításra fordítódik. Természetesen mindezt olcsón kell előállítani. Az elmúlt néhány évben Prof. Sir Colin Humphreys csapata a Cambridge Universityn sikerrel növesztett GaN LED szerkezeteket 6" átmérőjű Si-szeletekre, amik a legolcsóbb hordozók. Ezt a technológiát sikerrel optimalizálta és átadta a Plessey-nek, ami most egyszerre 7 db ilyen szeletre növeszti a LED szerkezeteket.

A LED-es világítás látványos felhasználási területe az autók lámpáiban megjelent és igen gyorsan terjedő LED-es, sőt újab-

ban lézeres világítás. Ezek nemcsak igen fényesek és hatékonyak, hanem mivel az áramfelvételük kicsi, így végső soron környezetvédelmi szempontból is előrelépést jelentenek.

Látjuk, hogy a díjazottak eredményei az optoelektronikán belül meghaladták a LED témakörét. Ugyanakkor utat nyitottak más, nem optoelektronikai eszközöknek is, mint pl. a nagyfrekvenciás, nagyteljesítményű tranzisztorok. A kétlépcsős növesztési technológia, a jó minőségű, egykristály GaN rétegek nélkül ezek nem készülhettek volna el. Márpedig a GaN alapú HEMT (High Electron Mobility Transistor) szerkezetek is igen fontosak, ezek mintegy 160 GHz-ig használhatóak és kb. 50 W/mm teljesítménysűrűséget (ahol mm-ben a gate hosszát értjük) érnek el a legújabb fejlesztésekben, és 8–10 W/mm-es értékkel kereskedelmi forgalomban is kaphatóak. Ezekben az eszközökben egy GaIn/GaN határfelületen (újabbán rácsillesztett InAlN/GaN határfelületen) kétdimenziós elektrongáz

keletkezik, és a töltéshordozók mozgékony-sága igen nagy. Ezek az eszközök miniatürizálják a távközlést és a teljesítményelektro-nikát.

Bár a szokásos nagybonyolultságú Si-processzorokat és áramköröket a GaN soha nem fogja helyettesíteni (költség okokból), de a nagyfrekvenciás alkalmazásokban új lehetőségeket nyitnak. A nagyon magas teljesítmény miatt jelenleg az egyik legérde-kebb kutatás-fejlesztés pontosan az ilyen eszközök hődissipációját akarja megoldani nagyon jó hővezető anyagok, pl. gyémánt, vagy grafén felhasználásával.

Talán ismert az olvasó előtt az a sajtó-visszhang, ami szerint Holonyákot, mint a LED feltalálóját, érdemtelenül mellőzte a Nobel-díj Bizottság. Az indoklás kiterjesztésével a fenti szempontokra (eszközökre) ez a vita elkerülhető lett volna. Meglátásom szerint a három díjazott megérdemelt en kapt a elismerést, és az indoklás-ban felsoroltnál sokkal több érdemet szer-zett.



A Természet Világában 2015-ben megjelent cikkek, amelyek a Fény Éve jegyében, a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával születtek

JANUÁR

Mester András: *Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tavaszi FÉNY-es rendezvényei*
Cserti József–Fábián Margit–Dávid Gyula: *A fizika mindenkié – fókuszban a fény*
Lenyűgöz a Világegyetem. Beszélgetés Fényes Lóránd asztrofotóssal

FEBRUÁR

Pécz Béla: *Fiat lux*
Kellermayer Miklós: *A mikroszkópos feloldási korlát áttörése*

MÁRCIUS

Piszer Gábor–Kertész Krisztián–Bálint Zsolt–Bíró László Péter: *Matematikai pontossággal látnak a lepkék*
Szaller Zsuzsanna–Tichy-Rács Éva: *Ultraibolya tartományban működő nemlineáris optikai egykristályok*

ÁPRILIS

Szili István: *Egy kis fényeskedés*
Csak borult ég ne legyen! Beszélgetés Éder Iván asztrofotóssal
Szabados László: *25 éve működik a Hubble-űrtávcső*

MÁJUS

Merkel Ottó–Kele Péter: *Eleven lámpások az éjszakában*

JÚNIUS

Sárnecky Krisztián: *Üstökösjárás (Első rész)*
Csehó Levente–Ruzsa Bence: *Csillagvadászat, avagy minden, amit tudni érdemes a londoni Királyi Csillagvizsgálóról*
Härtlein Károly György: *Hell Miksa tudományos játéka*
Marton Géza: *Engem a fény, téged az árnyék irányít*

JÚLIUS

Csaba György: *Fényegészség – fénybetegség*
Sárnecky Krisztián: *Üstökösjárás (Második rész)*

AUGUSZTUS

A talamusz titkai. Mire jó az optogenetika? Beszélgetés Acsády László professzorral
Schiller Róbert: *A kémia régi fénye*
Bór József–Hegedüs Tibor–Jäger Zoltán: *Sikeres vöröslidérc-észlelések Bajáról*

SEPTEMBER

Lente Gábor: *Távolban egy napvitorla*
Halak és a fény. Beszélgetés Juhász Lajos tanszékvezetővel

OKTÓBER

Szigeti Krisztián–Osváth Szabolcs: *A kinetikus képalkotás és a röntgen forradalma*
Rezsabek Nándor: *Mayer-Lambert Ferenc, a gellérthegyi csillagvizsgáló igazgatója*

NOVEMBER

Kern Anikó: *A vegetáció megfigyelése az űrből*
Dálya Gergely–Hanyecz Ottó–Szabó Róbert: *Kisbolygóvadászat Kepler-űrtávcsővel*
Beszélgetés a Vatikáni obszervatórium új igazgatójával
Oláh Erika: *Párizs szeme*

DECEMBER

Tószegi Zsuzsanna: *Petzvál József és a 175 év múltán újjá-remetett objektíve*
Kalotás Zsolt: *Az Év Természetfotósa pályázat a Fény Évében*

A Fény Nemzetközi Éve hazai programtervének megvalósításában legaktívabban résztvevő 24 partner-iskola részére a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat 2015-ben eljuttatta a Természet Világa havi lapszámain.



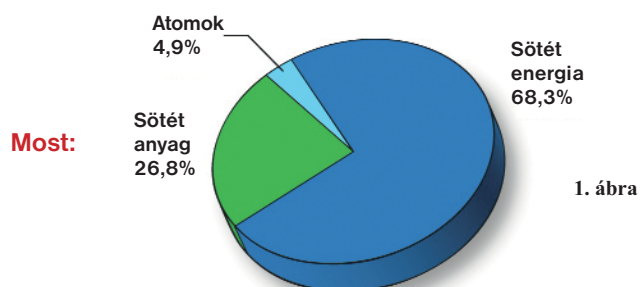
Tudományos
Ismeretterjesztő
Társulat

PATKÓS ANDRÁS

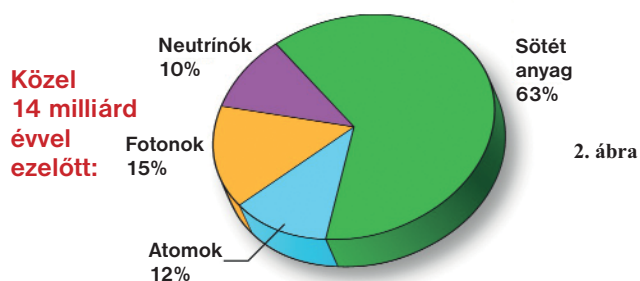
Létezhet-e anyag fény nélkül?

Kutatás a fénytelen anyag után

A fizikai alapjelenségek várhatóan legjelentősebb, a részecskefizikát és az asztrofizikát szoros egységbe kapcsoló XXI. századi kutatási irányzatának helyzetéről szeretnék áttekintést adni az Olvasónak. A Planck-űrtávcső [1] 2015. elején közzétett adatalemzése szerint az Univerzum energiát hordozó anyagának newtoni gravitációs erőhatást kifejtő hányada a teljes anyag 31,7%-a (lásd az **1. ábrán** a világoskékkel és zölddel színezett szeletek együttes súlyát!).



Ennek is csak mintegy hatoda a fény kisugárzására képes atomos anyag. A maradék öthatod hányad egyelőre ismeretlen alkotórészeit hívják *sötét anyagnak*. Táguló Világegyetemünkben a különböző anyagfélésegek energiataralmának megoszlása időben változott. A fiatal Univerzumban mind az atomos, mind a sötét anyagnak nagyobb részhányada volt (**2. ábra**) és a jelenlegi állapot legkevesébe értett összetevője, a sötét energia nem játszott semmiféle szerepet.



Az egyre távolabbra látó távcsövekkel készülő felvételek segítségével a Világegyetemnek egyre korábbi állapotáról nyerünk információt, így növekszik annak esélye, hogy a legkorábbi időszakról érkező jeleken felfedezzük a sötét anyag kozmikus jelenlétének nyomát.

A sötét anyag természetének megismerésére irányuló kutatás módszerét egyszerű, de találó szavakkal fogalmazta meg Mészöly Miklós író egy 1990-es újságinterjújában (ami nem a sötét anyagról szól): „A sötétség egy nagyon egyszerű dolog, meg kell találnom a technikát, a lámpát, amivel bevilágítom, így le van leplezve, mint ahogy egy rejtvény meg van fejtve.” A következőkben azokról a megvalósított vagy elképzelt eljárásokról számolok be, ame-

lyekkel a sötét anyag alkotórészeit igyekeznek megvilágítani. Az is kiderül, hogy a fizikusoknak a sötétség természetéről alkotott elképzelései némely esetben meghaladják az irodalmár fantáziáját.

A jól ismert sötét anyag: a neutrínók családja

Mindmáig egyetlen anyagfajtát ismerünk, amely nem mutat elektromágneses kölcsönhatást, azaz nem sugároz vagy nyel el fényt. Éppen ez a sajátosság az oka annak, hogy a létezésükre 1930-ban megfogalmazott hipotézis után negyedszázadot kellett várni, amíg a gyenge kölcsönhatás révén közvetlen bizonyítékot találtak a neutrínók létezésére [2]. A Napban keletkező neutrínók kimutatásának eljárása csak 2001-ben lett 100%-os hatásfokú, amikor a kanadai Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 1000 tonnás nehézvíz-(deutérium-) tartályának (**3. ábra**) deuteronjaival (d) és elektron-



3. ábra. Az SNO nehézvízes neutrínódetektorának víztartálya, az oldalán látható „mintázatot” a Cserenkov-sugárzást észlelő detektorok kivezetései alkotják

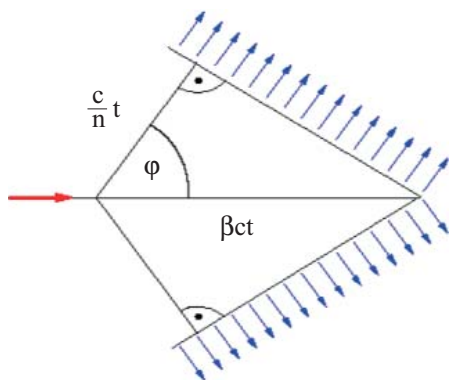
jaival (e^-) ütköző mindhárom fajta neutrínó (ν_e , ν_μ , ν_τ) gyenge kölcsönhatási reakcióját észlelték.¹ A következő kölcsönhatási reakciók lépnek fel:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-, \nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x, \nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-.$$

A felsorolt első reakcióban a deuteron mag neutronja az elektron típusú neutrínók hatására átalakul protonná és kirepül az egyidejűleg keletkező negatív töltésű elektron. A második és a harmadik reakciót bármelyik fajta neutrínó kezdeményezheti (erre utal az x index). A sorban második reakcióban a neutrínótól elszennvedett ütközés felhasítja a deuteront alkotórészeire, amelyek nagy sebességgel szétrepülnek. A harmadikban pedig a deutérium elektronját löki meg gyenge kölcsönhatása révén a beérkező neutrínó.

A kimutatás alapja a keletkező, illetve az eleve jelen lévő elektromosan töltött, a meglökéssel nagy sebességre gyorsított részecske által kibocsátott Cserenkov-sugárzás (a sugárzás szögeloszlá-

¹ A tökéletes neutrínó-detektálás ezen módszerének megalkotása tette lehetővé a neutrínófajták egymásba oszcillálásának felfedezését, amiért A. B. MacDonald elnyerte a 2015. évi fizikai Nobel-díj felét.



4. ábra. A kék nyílsorozattal jelölt irányban áramlik az elektromágneses energia a fénysebesség β hányadával a piros nyíl irányában haladó részecske keltette elektromágneses lökeshullámban. A lökeshullám terjedési sebessége c/n (ahol c a vákuumbeli fénysebesség és n a nehézvíz törésmutatója), ami kisebb, mint a részecske haladási sebessége. Az ábráról leolvashatók a lökeshullámot jellemző Mach-kúp geometriai adatai

sát a 4. ábra szemlélteti), amely a fény vízbeli terjedési sebességénél gyorsabban haladó töltött részecskék által kibocsátott fotonokból áll. Ezek a fotonok játsszák Mészöly lámpásának szerepét, amelyek adatait megmérve megállapítható a beérkező neutrínó lendülete, beérkezésének iránya és az egyes neutrínótípusok előfordulásának relatív nagysága is.

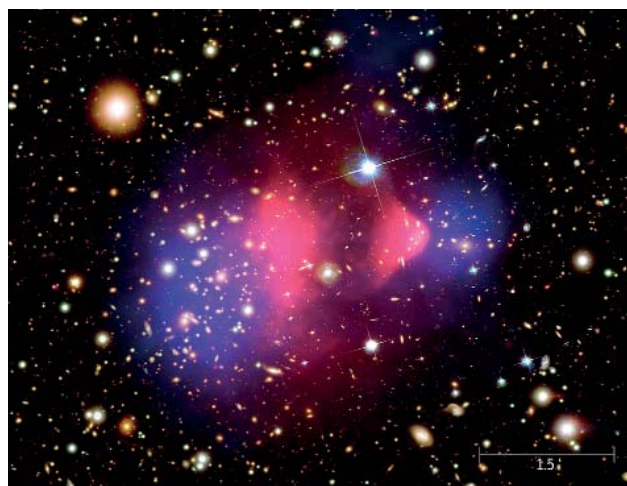
Ezt a mintát igyekeznek követni a sötét anyag ismeretlen összetevőinek kimutatásával foglalkozó kísérleti javaslatok többsége és az a növekvő számú csillagászati megfigyelés is, amelyekre a sötét anyag hatása természetes értelmezést kínál. Közülük alább bemutatjuk a legígéretesebbeket, illetve a legmeggyőzőbbeket.

A nehéz részecskékből álló sötét anyag hatásai kozmikus skálán

A sötét anyag a legelterjedtebb modellje szerint nagy tömegű, kis sebességű részecskéknél áll, az Univerzumot kitöltő gáza [3,4]. Miután sűrűségük hatszorosa a fénylő anyagénak, a tágulva lehűlő Univerzumban a tömegvonzás hatására elsősorban a sötét anyag alkotórészeiből álltak össze a legelső (ős)galaxisok. A sötét anyag gravitációs vonzereje ezek belsejébe „szívta” a fénylő atomos anyagot is. Minden mérés arra utal, hogy a mai galaxisokban ugyanúgy 1:6 a fénylő és a sötét anyag aránya, mint az Univerzum átlagában. A gravitációs lencsehatásban mindkét komponens kizárólag a tömegével van jelen, azaz egyformán aktív, egyformán hozzájárul a mögöttük lévő csillagok/galaxisok többszörös és jellegzetesen torzult képének kialakulásához. A gravitációs lencse képalkotását már Einstein elemezte, amikor az idén centenáriumi évébe lépett általános relativitáselmélet ellenőrzésére alkalmas jelenségeket kereste.

Amikor két galaxis áthalad egymáson („ütközik”) az alkotórészek közötti kölcsönhatási erők miatt módosul a tömegük eloszlása. Az ütközések révén az atomos anyag ionizálódik és a gravitációs és elektromágneses erők hatására gyorsuló töltött részecskék kibocsátott röntgensugárzás észlelhető az ürbe telepített röntgenszámlálókkal. Ennek a sugárzásnak a térbeli eloszlása lehetővé teszi, hogy az atomos anyag eloszlásának alakulását önmagában is feltérképezzük.

Az 5. ábrán két ütköző galaxis ütközés utáni képe látható. A lilás színezésű tartomány a röntgensugárzás intenzív forrásainak elhelyezkedését mutatja, míg a kék színezés a gravitációs lencsehatással a teljes tömegeloszlást követi. Az utóbbi jobban szétválik, mivel a sötét anyag alkotórészei közötti gravitációs vonzás



5. ábra. A két, egymáson áthaladó galaxis „ütközés” utáni eltérő tömegeloszlása a gravitációs lencsehatás (kék), illetve a röntgenemisszió (lila) alapján

sokkal kisebb erőhatást jelent, mint az ionizált anyag elektromos kölcsönhatása. A két eloszlás eltérő helyzetű középpontja utal arra, hogy a galaxisok áthaladásakor kétféle erősségű kölcsönhatás lépett fel anyagának alkotórészei között.

A kétfajta optikai technikával nyert eltérő térbeli fényeloszlás tehát közvetve utal gyengén kölcsönható, nagy tömegű részecskékből álló sötét anyag létezésére.

A közvetlen észlelésre, várakozásaink szerint leginkább a sötét anyag részecskéi és antirészecskéi találkozásokor bekövetkező annihilációban keletkező fény megfigyelése révén lenne lehetőség. Miután a sötét anyagnak nincs töltése, ezért fennáll a lehetőség, hogy a sötét anyagot alkotó χ részecske önmaga antirészecskéje legyen. Az annihilációs reakció egyenlete így írható:

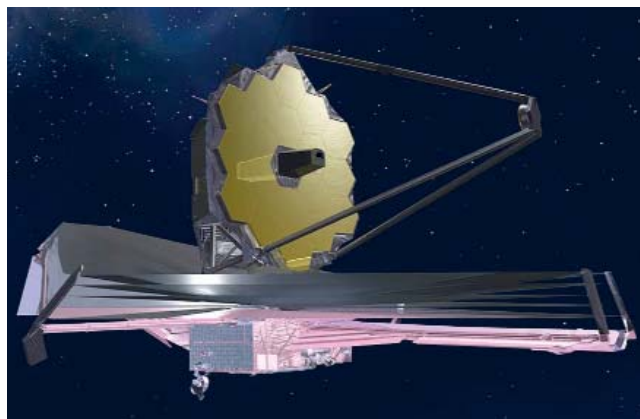
$$\chi + \chi \rightarrow e^+ + e^-,$$

és a töltött elektron-pozitron pár által kibocsátott fény detektálása adja a sötét anyagot megvilágító jelet.

A gond az, hogy a mai Világegyetemben a sötét anyag sűrűsége túl ritka ahhoz, hogy elég nagy gyakorisággal észlelhessék az annihilációs reakció fényét. Am a modern űrteleszkópokkal visszamehetünk a Világegyetem múltjába. Közel 14 milliárd évvel ezelőtt jóval nagyobb volt a sötét anyag sűrűsége (2. ábra),

6. ábra. Katherine Freese, a skandináv országok NORDITA kutatóintézetének amerikai igazgatója





7. ábra. A James Webb-űrtávcső művészi ábrázolása és tükre minőségének utolsó ellenőrzése 2015. július 11-én

az annihilációból származó sugárzás jóval intenzívebb lehetett. Katherine Freese, amerikai fizikus (6. ábra) és munkatársai néhány éve felvetették annak lehetőségét, hogy az ősrobbanást követően akár már néhány százmillió év elteltével olyan csillagok jöhettek létre, amelyekben a sötét anyag feldúsulva fordult elő.

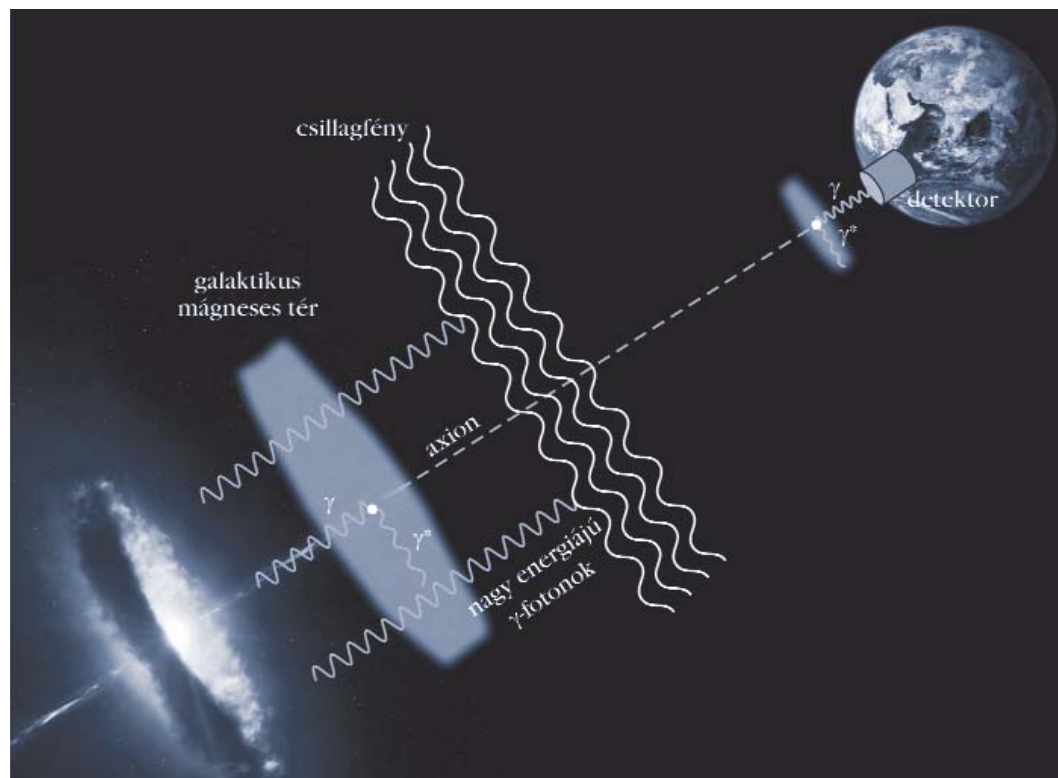
E csillagok stabilitása nem a gravitációs erő és a magfúzióból származó fotonok nyomása közötti egyensúly eredménye. A magfúzió termékeként megjelenő fotonok helyébe a sötét anyag annihilációjából származó sugárzás nyomása lép. Ezek a csillagok, amelyeket Freese „sötét csillagként” emleget [5], a szétsugárzási folyamat befejeztével, sok milliárd évvel ezelőtt eltűntek, de azok az új űrtávcsövek, amelyekkel a ma ismert legtávolabbi galaxisnál messzebből érkező jeleket is tudnak majd észlelni, képesek lesznek a szokásos csillagoknál jóval hűvösebb objektumoknak a fényét is felfedezni.

A Hubble-űrtávcső által látott legtávolabbi, azaz legrégebbi objektum 13,2 milliárd fényévre van. A kutatók azt remélik, hogy a

2018-ban indítani tervezett James Webb-űrtávcső (7. ábra) képes lesz ellátni a sötét csillagok korába.

A könnyű részecskékből álló sötét anyag hatásai kozmikus skálán

A sötét anyag természetére vonatkozó elképzelések másik osztályát az extrém kis tömegű elemi részek alkotják [6]. Ezek legjellemzőbb képviselőjének *axion* a neve, tömegét az elméleti fizikusok $10^{-7}\text{eV}/c^2$ -re becsülik. Ez a tömeg a még ismeretlen, de közvetett becslésekből 10^{-1} – $10^{-2}\text{eV}/c^2$ tömegűnek várt neutrínók tömegének is legfeljebb százszázad része. Az axionok legizgalmasabb tulajdonsága az, hogy bizonyos körülmények között, pl. erős mágneses tér jelenlétében képesek időlegesen átalakulni fotonná, majd bizonyos idő elteltével a foton visszaalakul axionná. Az erős mágneses teret nagyon rövid élettartamú fotonok sokaságaként



8. ábra. A kép bal alsó sarkában részecskecsövát kilővő galaxis nagy energiájú fotonokat is emittál. A galaxisközi mágneses tér hatására axionná alakul, majd a jobb felső sarokban jelzett földi detektorba érkezése előtt visszaalakul fotonná

lehet értelmezni a kvantumelméletben, amelynek egy kvantuma (ún. virtuális fotonja) olvad össze egy nagy intenzitású lézernyaláb egy fotonjával axionná. Az axion azonban nem hat kölcsön az atomos anyaggal, ezért a fényt ezt a „varázssapkát” feltéve jóval távolabbra képes akadálytalanul eljutni, mint nélküle.

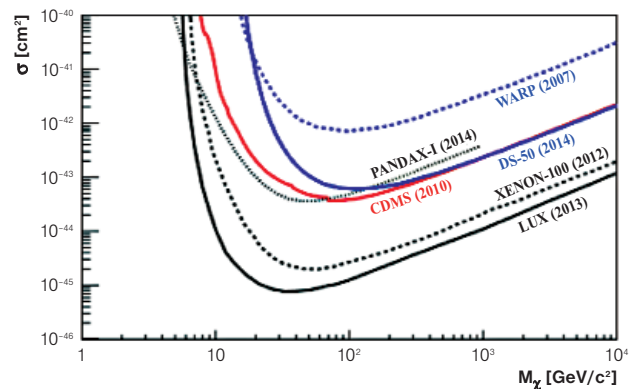
A kozmikus felvillanások közül a legnagyobb energiájú fotonokat kibocsátó források a *blazárok*. Ezek fényének intenzitása az Univerzumon való áthaladás során folyamatosan csökken, mivel fotonjai a közönséges csillagfény fotonjaival összeolvadva a kvantumelektrodinamika ismert folyamatainak egyike révén elektron-pozitron párokká alakulhatnak. Az intenzitás ebből következő exponenciális csökkenése határt szab annak a távolságnak, amelyen bekövetkező felvillanás fénye még észlelhető távcsöveinkkel. A paradox tapasztalat szerint viszont vörösetolódásukból becslve e maximális távolságnál jóval távolabbi felvillanások fénye is elér hozzánk. Természetes (de persze spekulatív) magyarázatot kínál egy elképzelt forgatókönyv, amely szerint a kozmikus mágneses térrel kölcsönhatva a blazár-fény bizonyos eséllyel „felteszi axion-varázssapkáját” és ebben az álruhában haladva, majd visszaalakulva a vártól nagyobb távolságon is újból fotonként észlelhető. Ezt az elképzelést jeleníti meg a **8. ábra**, ahol γ a foton jele, míg „B” a kozmikus mágneses teret jelzi.

A feltételezett folyamat közvetlen közelünkben is bekövetkezhet, hiszen a Nap rendelkezik erős mágneses térrel, és egyben erős fényforrás. Az előző forgatókönyv alapján működik a *Paul Siki-vie* amerikai fizikus által javasolt *helioszkóp*, amellyel igyekeznek kimutatni a Napból a Földre irányuló axion-áramlás létezését. Az elv egyszerű: erős mágneses térrel kell elősegíteni a Napban keletkezett láthatatlan axionok visszaalakulását fotonokká (**9. ábra**). Ha a mágneses tér mögötti tartományt teljesen elszigetelik a napfénytől, akkor a napfény frekvenciartományába eső, annak beérkezési irányával azonos irányba haladó fotonok észlelése olyan továbbító mechanizmus létezését jelentené, amely áthatol a fényzáró falakon.

A helioszkóp elvén alapuló teszt kísérletet eddig a CERN-ben és Japánban valósítottak meg. A CERN-ben előkészületek történnek egy nagyobb skálájú mérés beindítására (neve: International Axion Observatory = IAXO).

A sötét anyag részecskéi előállításának perspektívája földi laboratóriumban

A Higgs-bozon felfedezését követően a CERN LHC első számú feladata a Standard Modell kölcsönhatásaival nem rendelkező, tehát gyengén kölcsönható nagy tömegű elemi részecskék utáni vadászat. Ha léteznek, ezek a részecskék jelöltek a sötét anyag alkotórészeinek szerepére.

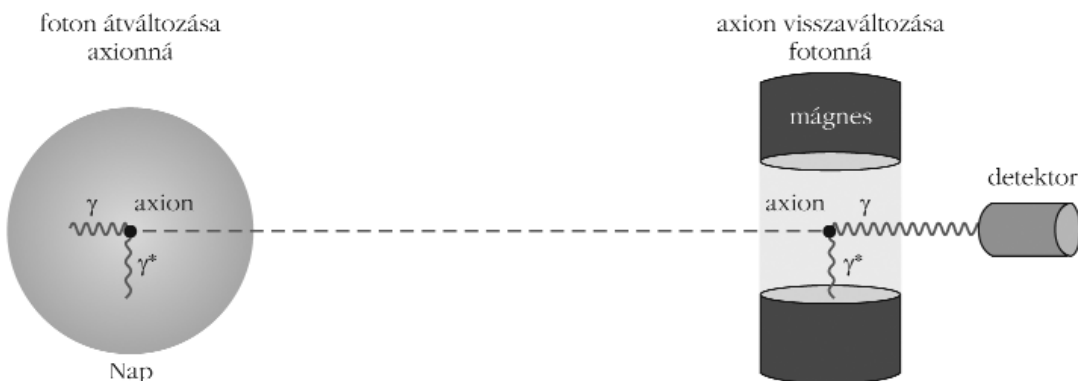


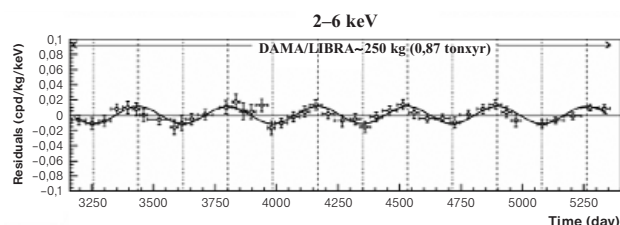
10. ábra. A sötét anyag feltételezett részecskéjének a vízszintes tengelyen logaritmikusan változó tömege függvényében változik a normál anyaggal mutatott kölcsönhatása erősségét jellemző ún. kölcsönhatási hatáskeresztmetszet megengedett legnagyobb értéke (felső korlátja). A egyes görbék a különböző kísérletek elemzéséből levont következtetést ábrázolják

A kutatás több, mint három évtizede folyik egyre nagyobb energiájú gyorsítókkal, amelyek egyre nagyobb tömegű részecskék felfedezését tennék lehetővé. Ám mindeddig nincs pozitív jel. Mivel a fénynek nincs kitüntetett szerepe a gyorsító részecskefizikai sötét anyag kutatásokban, e cikkben az előző három mondaton túl, nem foglalkozunk velük.

A kozmikus sötét anyag földi becsapódásának kimutatására több kísérlet is folyik, egyelőre egymásnak ellentmondó eredményekkel [4]. Az Appennin-félszigeten található Gran Sasso hegység mélyén, a 0 K hőmérsékleti alappont közelében nemesgázokkal (Ne, Ar) töltött detektorokkal várják a XENON100 és a párhuzamos DarkSide50 kísérletek kutatói, hogy a sötét anyag gyengén kölcsönható alkotórészein kívül egyéb elemi részecskék számára elérhetetlenül leszigetelt tartályokban egy atom meglöklődik valamilyen ismeretlen, a neon vagy az argon atomokkal összemérhető tömegű részecske által. A meglökött atom már elektromágneses erővel hat kölcsön az útja mentén elhelyezkedő többi atommal, és azokat lumineszcens fénykibocsátásra készíti. Ez a jel lenne alkalmas a sötét anyag alkotórészei tulajdonságainak meghatározására. Ám ezek a kísérletek mindeddig negatív eredménnyel jártak. A nem észlelt ütközés ténye is információként hasznosul: felső korlátot ad a sötét anyag tömege függvényében a keresett részecske és az ismert elemi részek közötti kölcsönhatás erősségére (a jellemző mennyiségnek hatáskeresztmetszet a neve). A különböző kísérletekből származtatott felső korlátot mutatja a **10. ábra** a hipotetikus részecskék tömegének függvényében.

9. ábra. A helioszkóp működési elve. A csillagozott γ^* szimbólumok a mágneses teret alkotó virtuális fotonokat jelzik. Az axiont fotonná visszaalakító és a foton észlelő berendezést minden egyéb fényforrástól el kell „falazni”!





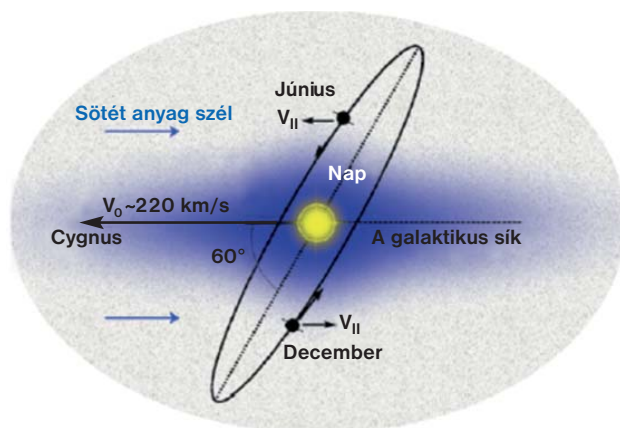
11. ábra. Az átlagos lumineszcens fényintenzitás periodikus ingadozása a DAMA/LIBRA kísérlet szerint [Time(day) – idő (nap), Residuals/cpd/kg/keV – eltérés a lumineszcens átlagteljesítménytől]

Az ugyanott végzett DAMA/LIBRA rövidítésű kísérlet hét éve követi a NaI egykristályokból álló detektorban észlelt lumineszcens jelek intenzitását. A negatív eredményekkel szemben határozott éves periodicitást tapasztalnak (11. ábra).

Egyszerű magyarázatként kínálkozik az elképzelés, amely kihasználja, hogy a Naprendszer jelenleg 220 km/s sebességgel halad a galaxisunk tömegközéppontjához képest átlagosan állónak képzelt sötét anyag eloszláshoz képest. Ennek megfelelően a Naprendszerhez rögzítve sötét anyagáramot kell észlelni a Földön. Azonban az áramerősség évszakosan változik, attól függően, hogy a Földnek a Naphoz viszonyított sebessége a közös sebességgel egyező vagy ellentétes irányú. Az effektust eredményező geometriai helyzetet a 12. ábra mutatja (a Nap pillanatnyi sebessége a Hattyú (Cygnus) csillagkép irányába mutat). A DAMA/LIBRA kísérlet eredményét a sötét anyag részecskéire hasonló elven vadászó COGENT mérés az Egyesült Államokban reprodukálta, viszont a XENON100, valamint az amerikai CDMS kollaborációk nem erősítették meg.

Az axionok földi detektálására vonatkozó elképzelés viszont a korábbiak alapján egyszerűen megérthető: a helioszkópot a hamburgi DESY-ben épített berendezéssel kiegészítették egy axionok előállítására szolgáló résszel is (13. ábra).

A DESY-ben korábban működő HERA részecskegyorsító erős mágneseit hasznosítják úgy, hogy a szupravezető mágnesek két pólusa közé nagy intenzitású lézernyalábot lőnek (a lézernyaláb előállításához világ színvonalú technikai háttérrel nyújt a DESY-ben épülő szabad elektron lézerberendezés (az XFEL)). A mágneses tér virtuális fotonjaival történő kölcsönhatás eredményeként remélik, hogy bekövetkezik az axion-keltés. A megmaradt lézersugarat elnyeli az útjába állított vastag betonfal, de az axionok (ha egyáltalán keletkeznek) akadálytalanul áthaladnak azon. A túldalalon újfent erős mágneses tér várja az áthaladó axionnyalábot, amelyből kicsi, de véges valószínűséggel bekövetkezik a vissza-



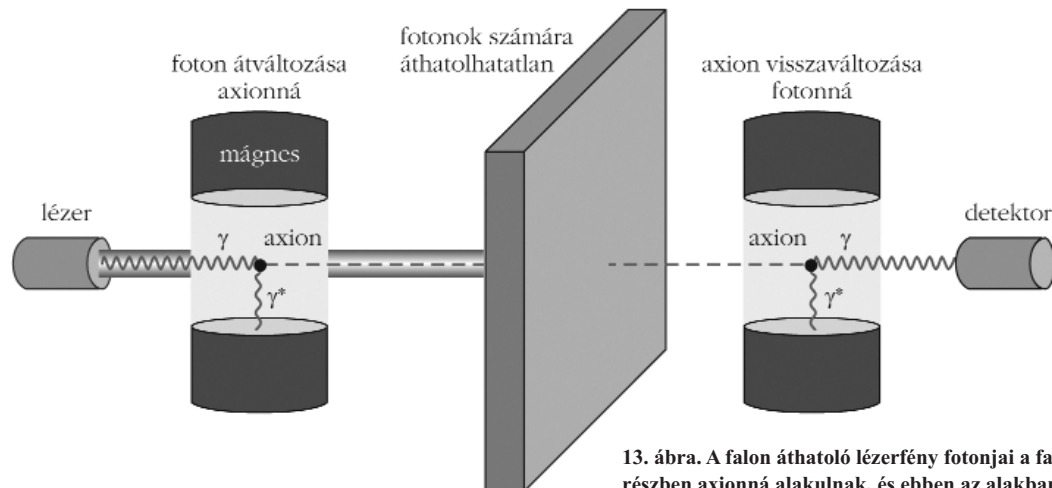
12. ábra. A Naprendszer és a Föld kombinált mozgásának geometriája

alakulás a kiinduló lézerrel azonos frekvenciájú fotonokká. Ez a meglepően elektromágneses „átsugárzás a falon” kísérlet. A 2018-ban teljes kapacitásával működni tervezett ALPSII rövidített nevű kísérletben akkor is marad a túldalalon detektálható foton a kiinduló lézerimpulzus 10^{24} fotonjából, ha csak minden milliárdodik foton alakul axionná, majd újabb milliárdosoros gyengítéssel történik a visszaalakulás.

Visszagondolva Mészöly Miklósnak a cikk elején idézett véleményére a sötétség természetéről, leszűrhetjük, hogy a sötétség természetének megállapítására valóban a legegyszerűbb mód jelenlétük „megvilágítása” fényt sugárzó töltött részecskéikkel. Ám az axionokra vonatkozó elképzelésükkel a fizikusok fantáziája színesebbnek bizonyult az íróénál. A fény és a sötétség akár egymást feltételező szimbiózisban is létezhet. ☀

Irodalom

- [1] Patkós András, *Eredmények az ESA Planck-szondájával*, Természet Világa 2014. évi II. különszám, 24. oldal
- [2] Patkós András, *Neutrínók és a téridő szimmetriái*, Előadás a 2013. évi Szkeptikus konferencián, megjelent az *Elbűvölt fizikus* című kötetben, 51. oldal (Typotex, 2015)
- [3] Németh Judit, Szabados László, *A sötét anyag*, Fizikai Szemle 2006. november, 362. oldal
- [4] Fényes Tibor, *Az Univerzum uralkodó anyagfajtája, a „sötét anyag”*, Fizikai Szemle 2008. március, 81. oldal
- [5] K. Freese, T. Rindler-Daller, D. Spolyar, M. Vallur, *Dark Stars: A Review*, arXiv:1501.02394
- [6] J. Jaeckel, A. Ringwald, *Ultrakönnnyű részecskék nyomában*, Fizikai Szemle 2015. július-augusztus, 218. oldal



13. ábra. A falon áthatoló lézernyaláb fotonjai a fal előtt erős mágneses térben részben axionná alakulnak, és ebben az alakban jutnak át a fal túldalára

SOLT GYÖRGY

Az első fény

Mint tűzijáték után: még néhány vörös csik, hamu és füst... szemünk előtt a lassan kihunyó napokkal, egy kihűlt kőn állva próbáljuk felidézni a születő világok vakító fényét.

(G. Lemaître, fizikus-csillagász, 1950)

Az ősrobbanás koronatanúja

Véges vagy végtelen a világegyetem, mióta létezik és meddig – örök kérdések, melyek minden kor gondolkodó emberét foglalkoztatták. A válaszokat kereső tudomány a csillagászat fejlődése és a fizikai törvények jobb megismerése révén egyre reálisabb képet alkotott a megfigyelhető univerzumból, de a világegyetem eredetéről, történetéről keveset tudott mondani. Fordulatot csak a XX. század első évtizedei hoztak: *Einstein* úttörő munkái nyomán megszületett a modern kozmológia, mely már az univerzum kialakulásáról, fejlődéséről, sőt jövőjéről is egy *számításokon és méréseken* alapuló konzisztens képet nyújt, és ennek alapján az említett örök kérdésekre (ha még nem is mindegyikre) megalapozott válasszal szolgál. Ez a kép, a mai tudásunkat összefoglaló *standard kozmológiai modell* feleletet ad arra is, mikor és hogyan született a kezdetben sötét univerzumot megvilágító *első fény*.

A standard modell alapján végzett számítások már az 1940-es években jelezték, hogy ez a fény az időközben eltelt évmilliók során sem aludt ki, jelen van ma is egy még felfedezésre váró, a világűr kitöltő maradék-sugárzás formájában. A jóslat beigazolódott, a másfél évtizeddel később megtalált *kozmosz mikrohullámú háttér-sugárzás* valóban a korai, forró univerzum fényének bizonyult. Univerzumunk a standard kozmológia szerint mintegy 13,8 milliárd évvel ezelőtt „ősrobbanással” (Big Bang) keletkezett, a tér és a benne foglalt megteremtődtek a feltételek ahhoz, hogy a mindaddig *átlátszatlan* anyagba zárt sugárzási energia szabadon terjedő fénné alakuljon. Ez a ma már halványabb és „hidegebb” hullámhosszakon világító fény a világegyetem legrégibb *látható* (teleszkópjainkkal megfigyelhető) csillagászati objektuma, egyedülállóan értékes forrás a korai univerzum kutatásában.

Az ősrobbanáson alapuló kozmológiai

modell egyébként nem volt mindig „standard”, sokáig csak egy volt a tudományos elképzelések között. A legnépszerűbb konkurens elmélet a *Fred Hoyle* és mások által javasolt *stacionárius* világegyetem-modell volt, amely szerint univerzumunk folytonosan, kezdet és vég nélkül létezik, állandó növekedése ellenére átlagosan mégis mindig ugyanazt a képet mutatja. A kozmológusok vitáját az univerzum forró kezdetéről tanúskodó háttér-sugárzás éppen 50 éve történt – *véletlen* – felfedezése döntötte el.

A (Nobel-) aranyat érő zaj

Arno Penzias és *Robert Wilson* 1964 őszén a Tejútrendszer közepéből érkező mikrohullámú (néhány cm hullámhosszú) rádiójelek vizsgálatára készültek. Először a szokott módon megmérték antennájuk „saját” zaját, a kaotikus zörejt, amit műszereik a keresett sugárzás *nélkül* is jeleznek, hiszen a várt jeleket majd ebből a zajos háttérből kell ki-hámozniuk. Zaj mindig fellép elektronikus áramkörökben, annál „hangosabban”, minél magasabb a hőmérséklet, de zajforrás az atmoszféra, a Nap, a talaj is. Penziasék nagy bosszúságukra azt találták, hogy antennájuk jóval zajosabb, szaknyelven „melegebb”, mint azt a fenti zajforrások indokolják. Mivel a többlet-zaj eredetét sehogyan sem sikerült megtalálniuk, le kellett vonni a következtetést: ezt a zajt csak egy világűrből érkező eddig ismeretlen, *különös* sugárzás okozhatja. Különös, mert ellentétben az űrből jövő ismert rádiójelekkel, melyek erőssége aszerint változik, hogy az égbolt vizsgált irányában milyen és mennyi sugárforrás (csillag, galaxis) található, ez a rejtélyes sugárzás *minden irányból egyforma erősséggel* érkezett. Mintha az antenna egy alacsony, nagyjából 3 K (–270 °C) hőmérsékletű, kozmikus nagy kiterjedésű gömb közepén volna, és a gömbfelület alakú kályha mikrohullámú hősugárzását észlelné. Penzias tanácsot keresve beszámolt a rejtélyes sugárzásról a közeli Princetonban dolgozó elméleti fizikusoknak. Ekkor kiderült, hogy a kollégáknak Penziasék eredménye csak annyiban volt (kellemetlen) meglepetés, hogy megelőzték őket. Valóban ez történt, a princetoniak számításai alapján ekkor

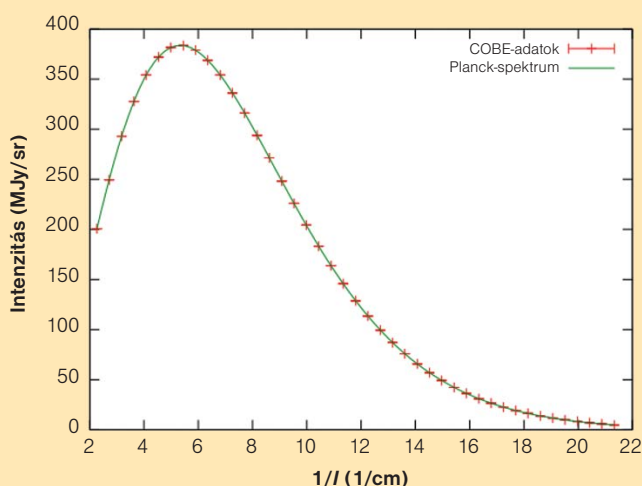
már tudták, hogy ilyen sugárzásnak léteznie kell, csillagászaik már a méréseket készítették elő.

De sem Penziasék, sem pedig (úgy tűnik) az elsősről lekészt princetoniak nem tudtak arról, hogy két fiatal elméleti fizikus, *Ralph Alpher* és *Robert Herman* már másfél évtizeddel előbb, 1948-ban felhívták a figyelmet a forró univerzumból megmaradt háttér-sugárzás létezésére. Munkájukra azonban akkor sem az elméletiek, sem a rádiócsillagászok nem figyeltek fel. Penzias és Wilson felfedezése már nagy visszhangra talált, ezt nyugtázta Nobel-díjuk 1978-ban.

Ideális színekép – sugárforrás sehol

A felfedezők csak egyetlen (7,3 cm) hullámhosszon mértek, a sugárzás spektrumáról teljes képet elsőként az atmoszféra zavaró hatását elkerülő, 1989-ben felbocsátott COBE (Cosmic Microwave Background Explorer) műhold műszerei szolgáltatották (**1. ábra**). A mért hullámhossz-eloszlás láthatóan nagy pontossággal követi a fizikában jól ismert Planck-spektrum (más néven „feketetest”-színekép) görbét. A Planck-spektrumot *egyetlen mennyiség*, a sugárforrás *T* hőmérséklete határozza meg, a maximális intenzitáshoz tartozó hullámhossz (itt 2 mm körül) *T*-vel fordítva arányos. (Az eloszlásfüggvény egyszerű formuláját itt nem szükséges idéznünk. Az ábrán az intenzitás egysége a rádiócsillagászatban szokásos jansky (Jy), $1 \text{ MJy/sr} = 10^{-20} \text{ W/m}^2/\text{Hz/térszög}$.)

A sugárzás tökéletes Planck-spektruma *meglepő*, mert világegyetemünkben hiába keressük hozzá a fénykibocsátó *forrást*, a 2,73 K hőmérsékletű testet. Tény az is, hogy a természetben, a Nap vagy a csillagok fényében ennyire pontos „feketetest”-színeképre még nem volt példa. Laboratóriumban is csak akkor, ha a fény a forró test *belsejébe* van bezárva, ahol a sugárzást határoló fekete falak (innen a név) tökéletesen elnyelik a nekik ütköző fénykvantumokat (fotonokat) és hősugárzásukkal biztosítják ezek pótlását. Csak ekkor tökéletes a *termikus egyensúly* anyag és sugárzás között, ami az ideális Planck-spektrum felté-



1. ábra. A kozmikus háttérsugárzás intenzitásának spektrális eloszlása az $1/\lambda$ hullámhossz reciprokának függvényében. A mért adatok pontosan illeszkednek a $T = 2,725$ K hőmérsékletre tartozó Planck-eloszlás görbéjéhez (COBE)

tele. A világűrben azonban ilyen kozmikus méretű, a háttérsugárzást körülzáró és vele termikus egyensúlyban lévő $\approx 2,73$ K hőmérsékletű test sehol sem található. Ehelyett ritkán elszórt, nagyon különböző hőmérsékletű és ennek megfelelően különböző színű csillagokat, galaxisokat látunk, ezek mellett a teret betöltő háttérsugárzás önállóan létezik.

A fény születése

A pontos Planck-színkép magyarázatát tehát csak a sugárzás távoli múltjában kereshetjük. Ehhez elegendő, ha a világegyetem történetéből az ősrobbanás után mintegy 60 000 évvel kapcsolódunk be, amikor a hőmérséklet már $\approx 10\,000$ fok alá hűlt le. Az univerzum anyaga ekkor (az itt szerepet nem játszó neutrínók mellett) elektronok, protonok, He-atommagok, neutronok és jó részt fotonok (fénykvantumok) forró, sűrű „őslevese” volt. Ebben az elektromos töltésekkel teli folyadékban (plazmában) a részecskék állandó ütközése, elsősorban a fotonok elektronokon való szóródása biztosította, hogy a hőegyensúly a részecskék és az energia nagy részét kitevő fotongáz között éppoly tökéletes legyen, mint a laboratóriumban falak közé zárt sugárzás esetén. Különbség azonban, hogy a sűrű plazmában a fotonok szabad (ütközés nélküli) úthossza mikroszkopikusan rövid, az ősplazma ezért átlátszatlan volt, akár a sűrű köd, belsejében fény nem terjedhetett.

Később, a hőmérséklet sülyedésével ≈ 4000 foknál a szóródást okozó elektronok lelassultak, közülük egyre több kötődött meg az őket vonzó pozitív protonokon (és ne-

gyedrészben jelenlévő He-atommagokon), megalkotva az első hidrogén (H) és hélium atomokat. A kezdetben még könnyen szét-eső atomok a fotongáz további lehűlésével stabilizálódtak, és mivel a H- és He-atomokon a kisenergiájú fotonok gyakorlatilag nem szóródnak, a fotonok szabad úthossza egyre növekedett. Ez volt a rekombináció (vagy utolsó szóródás) időszaka. Amikor ≈ 3000 foknál a szabad elektronok végleg elfogytak, a világűr kitöltő hidrogén- és héliumgázban a fény terjedését már semmi sem akadályozta: az univerzum kivilágosodott.

A rekombináció időszaka, amikor tehát szóródás hiányában fokozatosan megszaktadt a kapcsolat sugárzás és atomos anyag között, nagyjából 300 ezer évig tartott, de ez a kozmológia milliárdéves időskáláján mégis csak rövid pillanat. Az első, a napfénynél kissé vörösebb, világűr betöltő fény önállósodásának ebben a „pillanatában” természetesen az utolsó, ≈ 3000 fokos hőegyensúlyból származó Planck-színképet mutatta.

Miért mikrohullámok?

Az univerzum első fényét a világűrben később lejátszódó események, galaxisok, csillagok képződése csak kevésbé érintették. A sugárzás mégis alaposan megváltozott, színképét a kozmikus vöröseltolódás a láthatóból a mikrohullámú tartományba helyezte át.

Ezt a színkép-eltolódást nem a fényforrás és megfigyelő relatív mozgása (nem Doppler-effektus), hanem a tér tágulása okozza. Jól ismert tény, hogy egymástól távoli galaxisok között a távolság növekszik, és a távolodás törvényszerűségei azt bizonyít-

ják, hogy ez nem a galaxisok rendezetlen saját mozgásának, hanem a közöttük lévő fizikai tér folytonos kiterjedésének következménye. Kevésbé közismert, hogy a tér tágulása a világűrben terjedő fényre is hatással van: a fényhullám két „völgye” közötti távolság, a hullámhossz is folyamatosan növekszik. Hogy milyen mértékben, azt minden t időpontban a tágulással arányos, idővel monoton növekvő $a(t)$ skálafaktor mutatja meg ($a(t)$ a megfigyelt adatokon alapuló elméleti számítások eredményeként adódik). Ha az ősrobbanástól számított t_1 időpontban $a(t)$ értéke $a(t_1)$ és később, $t_2 > t_1$ -kor $a(t_2)$, ez azt jelenti, hogy a tér minden irányban $a(t_2)/a(t_1)$ -szeresére növekedett. Ha tehát a fény hullámhossza t_1 -kor λ_1 volt, ez t_2 -kor már $\lambda_2 = \lambda_1 \cdot a(t_2)/a(t_1)$ értékűre nőtt, a z -vel jelölt relatív változás, a vöröseltolódás értéke

$$z = (\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda_1 = a(t_2)/a(t_1) - 1.$$

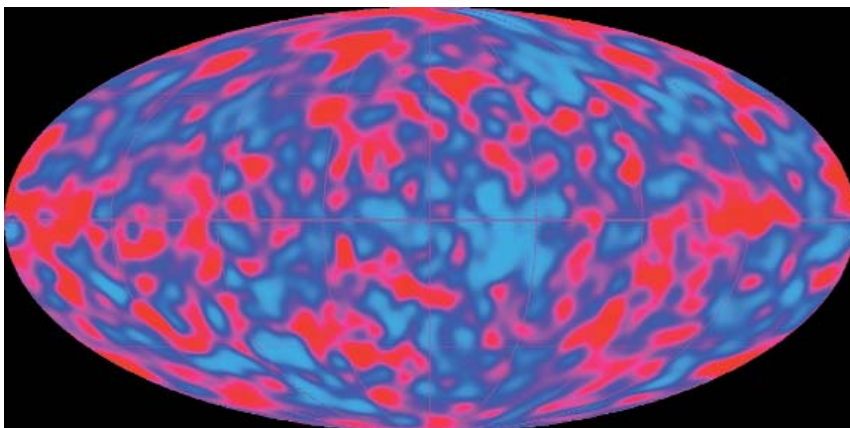
Lényeges, hogy a színkép minden hullámhossza ugyanolyan arányban változik, ezért a szabadrádióvá vált sugárzás megőrizte Planck-színképét, csak $a(t_1)/a(t_2)$ -szor alacsonyabb hőmérséklettel.

Az 1. ábra tehát a rekombinációs kori 3000 K Planck-eloszlás mai képe a vöröseltolódás okozta alacsony, 2,725 K hőmérséklettel, ezért egyetlen osztással meg tudhatjuk, hány-szorosára nőtt az univerzum a rekombináció óta. Jelölje $a(t_0)$ a skálafaktor jelenlegi ($t_0 = 13,8$ milliárd év) értékét. A sugárzás mai $T_0 = 2,725$ K hőmérséklete az előbbieket szerint $a(t_1)/a(t_0)$ -szor kisebb a rekombináció-kori $T_1 = 3000$ K foknál, vagyis $a(t_0)/a(t_1) = 3000/2,725 \approx 1100$, tehát a világegyetem a fény megjelenése óta minden irányban 1100 szorosára növekedett!

A ma hozzánk érkező fény kozmikus vöröseltolódása, $z = (\lambda_0 - \lambda_1)/\lambda_0 = a(t_0)/a(t_1) - 1$ annál nagyobb, minél hosszabb idő óta voltak úton a fotonok (minél kisebb t_1 és vele $a(t_1)$), függetlenül attól, mi volt a fény forrása. Az egyik legrégibb ismert galaxis több milliárd éves utat megtett fényének vöröseltolódása például $z = 8,5$, tehát a $z \approx 1100$ értékű háttérsugárzashoz képest még az univerzum legelső galaxisai is fiatal képződmények! A nagyjából 20 és 1100 közötti z -értékek mutatják, hogy a rekombinációt követően még párszáz millió év telt el addig, amíg az új fényforrások, a galaxisok, csillagok megjelentek az univerzumban.

Színre lépnek a fluktuációk

A COBE programmal először sikerült a háttérsugárzás hőmérsékletének irányfüggését is az egész égboltra kiterjedően feltérképezni. A 2. ábra a hőmérséklet eloszlását mutatja azon a látóhatárunkat képező gömbfelületen (az „utolsó szóródás felületén”), ahonnan ma a sugárzás fotonjai hoz-



2. ábra. A kozmikus háttérsugárzás hőmérséklet-eloszlásának első teljes égboltot átfogó térképe (COBE, 1992). A kép vízszintes egyenlítője galaxisunk, a Tejútrendszer síkjában van. A színezés az átlagos hőmérsékletnél melegebb (vörös) és hidegebb (kék) fluktuációkat mutatja. A hőmérséklet átlagosan 2,725 K, a fluktuációk statisztikus átlagértéke néhányszor 10^{-5} K (NASA-COBE)

zánk érkeznek. A két legfontosabb eredmény:

1) a sugárzás nagymértékben *izotróp*, hőmérséklete minden irányban csak néhány század fokkal tér el az egész égboltra vett 2,725 K átlagértéktől,

2) ugyanakkor ezen az izotróp háttéren különböző méretű, 10^{-5} K nagyságrendű apró, helyi hőmérséklet-fluktuációk is jól kirajzolódnak.

A sugárzás nagyfokú izotrópiája a korábbi eredmények ismeretében már nem volt igazi meglepetés, a COBE adatok ezt csak az előbbieknél pontosabban igazolták. A valódi szenzáció a csak néhány század

fok nagyságú, de a COBE méréseiben mégis jól látható hőmérséklet-fluktuációk felfedezése volt, ezek a korai univerzumból megmaradt nyomok, mint látni fogjuk, valódi aranybányát jelentenek a kozmológiai kutatás számára. (A programot vezető *J. Mather* és *G. Smoot* 2006-ban meg is kapták a témakör immár második Nobel-díját.)

A NASA által 2001-ben felbocsátott és kilenc éven át adatokat küldő WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), majd a 2014-ig működő „Planck” űrtávcsövek célja éppen az volt, hogy az anizotró-

piákról nagyobb felbontású képeket szolgáltassanak. A 3. ábra a WMAP hőmérséklet-térképet mutatja.

A nagy felbontású mérésekből kiderült, hogy a hőmérséklet-anizotrópiák amplitúdója és mérete között jól meghatározott összefüggés (korreláció) áll fenn. Erre a korrelációra visszatérünk, előbb azonban meg kell álljunk a sugárzás szinte tökéletes, de távolról sem magától értetődő izotrópiájánál.

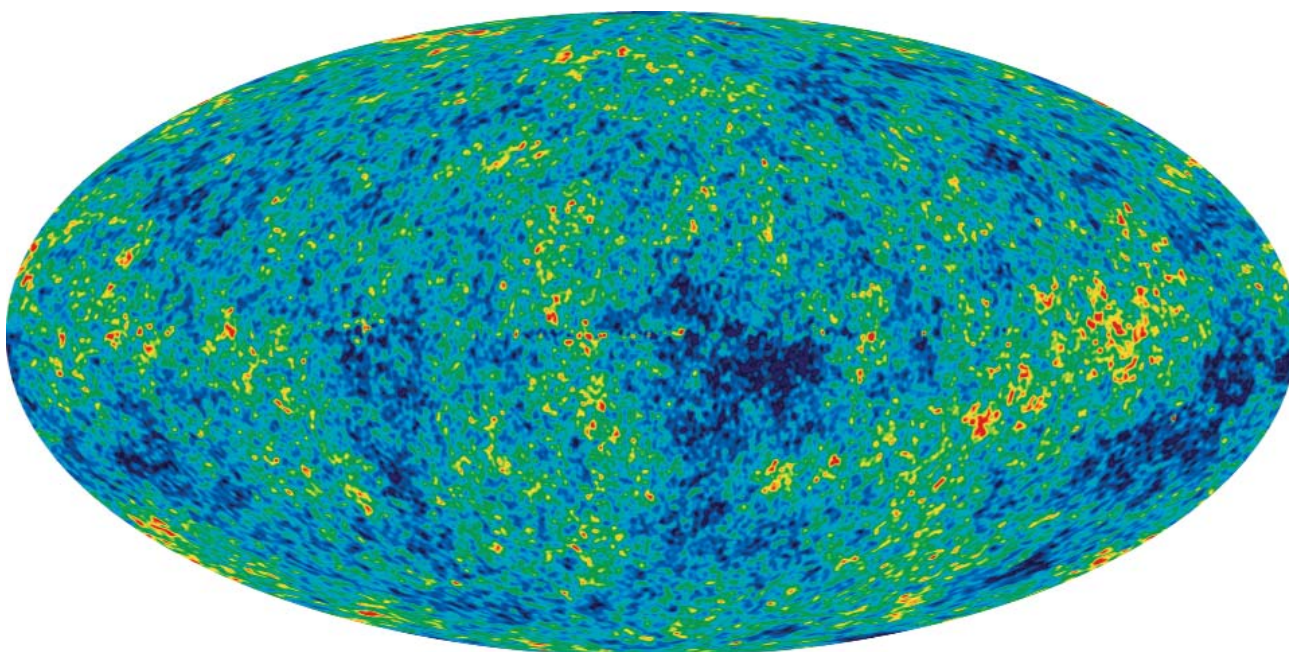
Az érthetetlen izotrópia

Láttuk, honnan származik a sugárzás Planck-spektruma, de ebből még nem következik, hogy ez a spektrum az égbolt minden irányában *ugyanolyan* hőmérsékletű. Annyira nem, hogy ez a tény *horizont-probléma*ként sokáig nyugtalanította a kozmológusokat.

A problémát okozó *horizont* (részecehorizont) az a gömbfelület egy M pont körül, melynek belsejéből a múltban kibocsátott fényjelek eljuthattak M -ig (és viszont). Horizont minden időpontban létezik, mert az ősrobbanás óta eltelt t idő alatt a fény csak véges utat tehetett meg, egy adott t időpontban tehát a horizont sugara (elméleti finomságtól eltekintve) $\approx c \cdot t$ (itt c a fénysebesség). Mivel minden más kölcsönhatás a fényjeleknél csak lassúbb lehet, anyagi pontok csak *horizontjukon belüli* anyagrészekkel lehettek fizikai kapcsolatban.

Most pedig gondoljuk meg, hogy ha nem tételezünk fel egy már az ősrobbanáskor teljesen homogén univerzumot (amit nehéz

3. ábra. A háttérsugárzás hőmérséklet-eloszlása a COBE-méréseket követő nagyfelbontású WMAP mérései alapján. Az átlaghőmérséklet $2,7255 \pm 0,0006$ K, az ettől való eltérések, fluktuációk amplitúdójának statisztikus átlagértéke mindkét irányban néhány század K (NASA-WMAP)



volna megindokolni), a rekombináció idején született háttérsugárzás mindenhol egyforma hőmérséklete csak úgy jöhetett létre, hogy a sugárzással hőegyensúlyt tartó anyagrészek a múltban valamikor *kapcsolatot tarthattak*, hőt cserélhettek.

Az minden számolás nélkül *látható*, hogy a *rekombináció idején* már ilyen kapcsolat nem létezett. A 2. ábra felső („északi”) széléről a rekombinációkor induló fény *hozzánk* (a gömb közepére) is csak most érkezik, tehát még éppen *félúton* van az égbolt átellenes, „déli” szélétől. A mi horizontunk átellenes vidékei tehát a rekombináció idején már *egymás horizontján kívül* voltak, még fényjeleket sem cserélhettek, nemhogy hőmennyiséget.

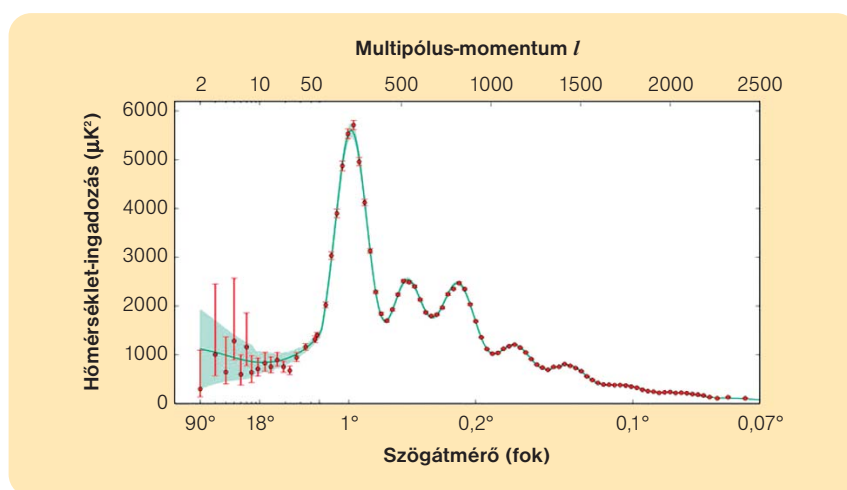
De talán korábban? És itt a probléma: a „klasszikus” (1980 előtti) kozmológia szerint időben visszafelé haladva a horizont sugara két anyagi pont távolságához képest egyre *rövidebb* volt. Ezért a sugárzás hőmérsékletét megszabó anyag egymástól távoli részei nemcsak a rekombináció idején, de a rekombinációt megelőzően *méginkább* egymás horizontján kívül estek, nem is „tudhattak” egymás hőmérsékletéről.

Inflációs epizód

A problémát megoldó ötlet *Alan Guth* amerikai fizikustól származik, aki pedig csak azt akarta megérteni, miért nem sikerül a természetben mágneses egypólust találni. Olyan mágnes, ami egészében csak északi vagy déli pólus, ahogyan van külön pozitív és negatív elektromos töltés. Mágneses egypólusok keletkezésére az elmélet szerint az univerzum nagyon forró ($\approx 10^{24}$ K), korai korszakában volt is lehetőség. Guth 1980 körül jutott arra a gondolatra, hogy az ősrobbanást közvetlenül (10^{-36} másodperccel) követően egy mindössze 10^{-32} másodpercig (!) tartó epizód, az *infláció* (felfúvódás) következett, melynek során az univerzum tere *sok nagyságrenddel* megnövekedett. Ha tehát volnának is mágneses egypólusok, sűrűségük az inflációval annyira lecsökkent, hogy látóhatárukon belül nincs esélyünk akár egyre is ráakadni.

Az egypólus-kérdésnek ez az *egyik* lehetséges megoldása még nem bizonyíték az infláció mellett. Tény azonban, hogy az infláció a kozmológia *egyszerre több* nyitva maradt kérdésére, így a háttérsugárzás izotrópiájára is meggyőző magyarázatot ad.

Tekintsünk a korai univerzumban egy apró gömböt, melynek sugara az ősrobbanás utáni 10^{-36} -ik másodpercben éppen az akkori horizont-távolság, tehát $c \cdot 10^{-36}$ másodperc $\approx 3 \cdot 10^{-26}$ cm. Ezen a horizont-méretű gömbön belül tehát a hőmérséklet-különbségek hőcsere útján elsimulhattak. Ha az ezt követő infláció a távolságokat és horizontokat $\approx 10^{30}$ -szorosára nagyította (ami az elméletileg várt nagyságrend), a



4. ábra. A háttérsugárzás anizotrópia-spektruma: az átlagos hőmérséklettől való eltérések amplitúdójának négyzete a fluktuációk szögátmérőjének függvényében. A pontok a WMAP (3. ábra) és legújabb Planck-mérések eredményei. Az egymást egyenlő távolságban követő csúcsok sűrűség-hullámok nyomai, helyzetükből és intenzitásukból a kozmológiai paraméterek értékeinek minden eddiginél pontosabb meghatározása vált lehetővé (az elméleti görbe ezeken az értékeken alapul). Az l „multipólus-momentum” növekvő értékéhez nagyobb szögfelbontás tartozik, 1 fok $\approx 180/l$ (ESA-Planck)

gömb $\approx 10^{-26}$ cm-es átmérője az *infláció végén* már 10^4 cm. Ettől kezdve a tér tágulása a klasszikus standard kozmológia szerint folytatódott, ami a gömb átmérőjét már lassabban, évmilliárdok alatt, de máig mégis további 10^{27} -szeresére, 10^{31} cm = 10^{13} fényévre növelte.

Ez a távolság azonban már sokszorta *nagyobb, mint látható* univerzumunk sugara, ami az ősrobbanás óta eltelt időnek megfelelően $\approx 14 \cdot 10^9$ fényév. Ami azt jelenti, hogy a hozzánk érkező háttérsugárzás egy *közeliítőleg homogén hőmérsékletű*, az inflációval felfújt térrész *belsejéből* származik, így nem meglepő, hogy a sugárzás hőmérséklete csaknem teljesen izotróp — a mégis meglévő anizotróp fluktuációk pedig, mint látni fogjuk, szintén az inflációval kapcsolatosak.

(Közbevetőleg: elgondolkodtató, hogy mai univerzumunk egy kezdetben 10^{-26} cm-es sugarú gömb része volt. Emellett még az atommagok sugara, $\approx 10^{-13}$ cm is elképesztően nagy.)

Hanghullámok nyomai a fényben

Az inflációs kort jellemző extrém hőmérsékletek és a részecskegyorsítókban elérhetőnél sokmilliárdszor nagyobb energiasűrűségek kísérletileg nem reprodukálhatók, de az infláció látható következménye az a *korreláció* (statisztikus összefüggés), ami a háttérsugárzás hőmérséklet-fluktuációinak *intenzitása és látószög-átmérője* között fennáll. A 4. ábra ezt a korrelációt, az *anizotrópia-spektrumot* mutatja.

Az elmélet szerint az inflációs „robbanás” az ős-plazmában *akusztikus sűrűség-hullámokat* keltett, a sűrűség a hullámok frekvenciájának megfelelően periodikusan változott. Az alaphang mellett ennek *egészszámu többszöröse*, a harmonikusok is jelen voltak, a rezgések kezdeti fázisát az infláció azonosra állította be. A rekombináció időpontjában éppen maximális (pozitív vagy negatív) sűrűség-eltérések helyét a háttérsugárzás pillanatfelvétele melegebb (vagy hidegebb) foltként rögzítette (nagyobb foton-sűrűség esetén magasabb a hőmérséklet). A rekombinációkor éppen maximális ingadozások egy meghatározott frekvenciához („alaphanghoz”) és ennek harmonikusaihoz („felhangjaihoz”) tartoznak (lényeges, hogy az alaphang és harmonikusai azonos fázissal indultak). Ezt mutatja a csúcsok helyzete a 4. ábrán, ami egyben nyomós érv a kezdeti fázist beállító infláció-hipotézis mellett. A legnagyobb, ≈ 1 fok átmérőnél lévő csúcs az alaphang-maximum képe, a felhang-maximumok a csökkenő hullámhosszaknak megfelelően egyre kisebb méretű fluktuációk nyomai. A csúcsok helye és magassága érzékenyen függ a kozmológiai paraméterektől, ezért a spektrum kiválóan alkalmas ezek meghatározására. Az alaphang-maximum a számítások szerint jobbra tolódna egy „görbült” (nem-euklideszi) terű univerzumban, a csúcs helyzete tehát annak jele, hogy *terünk kozmikus méretekben is euklideszi* (közvetlenül nagy háromszögek szögeinek összege is 180 fok). Hasonlóan, az amplitúdók arányából minden eddiginél pontosabban kiolvasható volt, mekkora az ismeretlen „sötét anyag” részesedése az univerzum

anyagában. Elméletileg az is jól követhető, hogyan alakultak ki ezekből a sűrűség-ingadozásokból a gravitáció hatására az univerzum mai struktúrái, a különböző formájú galaxisok és galaxishalmazok.

És a gravitációs hullámok?

A háttérsugárzásnak főszerep jut a kozmológia ma egyik legizgalmasabb területén, a gravitációs hullámok keresésében is. A tér geometriáját moduláló gravitációs hullámok nagyon kis amplitúdójúak, várhatóan csak akkor érik el a mérhetőség határát, ha valami „katasztrofálisan” nagy kozmikus esemény, két neutroncsillag egybeolvadása, galaxisok ütközése, vagy éppen az infláció kavarta fel őket. Itt a háttérsugárzás polarizációja jön a kozmológia segítségére. A fotonok a mai univerzum forró galaxisain áthaladva ismét találkoznak szórás okozó szabad elektronokkal. A gravitációs hullámok egyik fajtája úgy deformálja a tér szerkezetét, hogy a hullám útjába kerülő elektronokon való szóródás után a fény „B-típusú”, egyféle jellegzetes cirkuláris polarizációt nyer, amit – nagy skálán – csak ilyen gravitációs hullámok hozhatnak létre. A B-típusú polarizációt kereső ballon mérések 2006-ban kezdődtek és nemrégén úgy tűnt, sikerrel is jártak. A mért jelről később kiderült, hogy nem gravitációs hullámokkal kapcsolatos, de a mérések nagyobb pontosságú detektorokkal folytatódhatnak.

A háttérsugárzás felfedezése, ahogyan ez a csak vázlatosan felsorolt eredményekből is látható, fordulópont volt a modern kozmológiában, a sugárzás vizsgálata a legközvetlenebb, legpontosabb és legeredményesebb módszernek bizonyult a korai univerzum csak nyomokból rekonstruálható történetének megismeréséhez. A sugárzás segítségével nyert új kozmológiai ismeretek tudományos értékét (a két Nobel-díj mellett) jól jellemzi, hogy S. Hawking a hőmérséklet-fluktuációkról nyert első COBE-képeket lelkesedésében „a század, de talán minden idők legnagyobb felfedezéseként” üdvözölte. A sugárzás anizotróp fluktuációi valóban azonnal a kozmológiai kutatások középpontjába kerültek, és az utóbbi két évtized jelentős eredményei alapján joggal remélhető, hogy a mérési technika fejlődésével ez az eredmény sorozat a jövőben is folytatódik. ☀

Irodalom

Steven Weinberg: Cosmology. Oxford University Press, 2008.
Sean Carroll: Spacetime and Geometry. Pearson Education, 2013.
Frei Zsolt – Patkós András: Inflációs kozmológia. Typotex Könyvkiadó, 2004.
Feltárul a Világegyetem. A Természet Világa 2009. I. különszáma.

KISS L. LÁSZLÓ

A számokká alakított fény

Digitális égboltfelmérések

A jelenkor csillagászata számos apró részletkérdésre keresi a választ. A földi légkörön túli térség objektumainak természete, a kapcsolódó fizikai jelenségek értelmezése komplex szaktudást igénylő tudományos munka, melynek hatékony elsajátításához évekig tartó szakosodásra van szükség. Ha azonban kicsit hátrébb lépünk és felmérjük a tájat, kirajzolódik három jól elkülönülő terület, amelyeket jól megfogalmazható alapkérdések jellemeznek.

A csillagászat nagy kérdései...

- Mikor és hogyan keletkezett a Világegyetem? Mi a mindenség eredete?
- Hogyan alakulnak ki a kozmikus struktúrák (bolygók, csillagok, galaxisok)?
- Mennyire egyedi a Föld? Egyedül vagyunk-e az Univerzumban?

Ezek az alapkérdések sok átfedést mutatnak más tudományterületekkel. Míg példá-

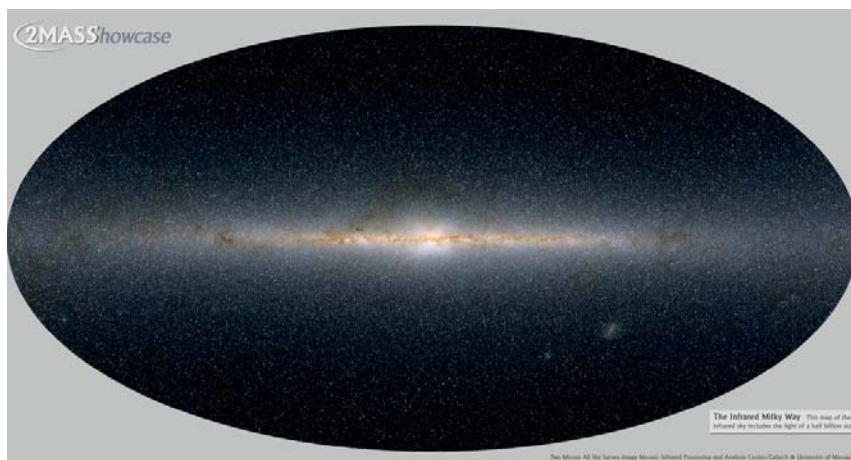
ul a kozmosz szerkezete és eredete a korai forró Univerzum vizsgálatain keresztül erősen kapcsolódik a nagyenergiájú fizikához és a részecskefizikához, addig a földi élet kozmikus tükrképének keresése földtudományi, kémiai, biológiai, klimatológiai területeket érintve keresi a filozófiai aspektusokkal is bíró nagy kérdésre a lehetséges válaszokat. Nem véletlen, hogy a kutatások egyre inkább nagy nemzetközi együttműködésekben folynak, hiszen a sikerhez fontos a tudományterületeken átvívelő tudás, amit csak széles spektrumú kutatócsoportok képesek biztosítani.

A csillagászatban mindmáig nagyon erős irány az égi jelenségek egyre részletesebb megfigyelése és a mérési adatok értelmezése. A számítástechnika robbanásszerű fejlődése mellett a műszertechnika is hihetetlen hatékonyságjavulást ért el. Az égitestek által kibocsátott fény detektálása az asztrofotonikai és mikroelektronikai áttöréseknek köszönhetően minden korábbinál nagyobb hatékonysággal zajlik, és immáron átlagos felszereltségű profi obszervatóriu-

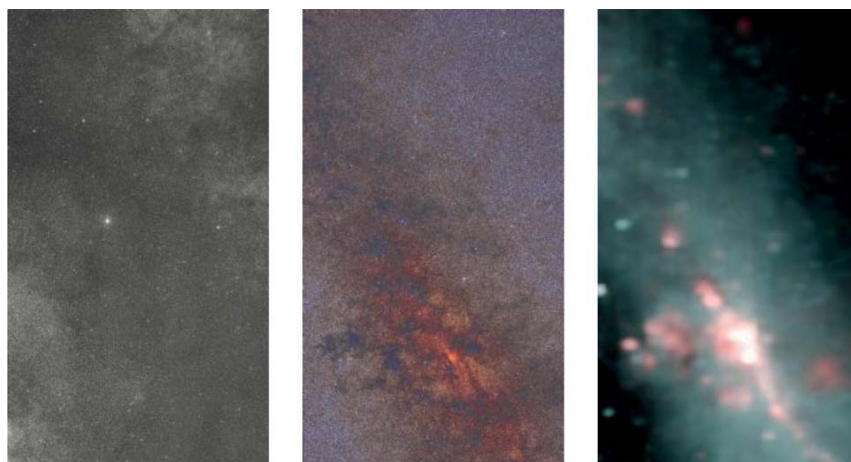
Sötét égen gyönyörűen hömpölyög a Tejút sávja



Forrás: Google Images...



A 2 mikronos hullámhosszon látható Tejút (Forrás: 2MASS)



Ugyanaz a terület az optikai (balra), közeli infravörös (középen) és távoli infravörös (jobbra) hullámhosszakon (Forrás: 2MASS)

mokban is megjelentek az akár 90–95%-os fényhasznosítású digitális detektorok (azaz a beeső fotonáram 90–95%-a átalakítható digitális jellé, mindközönségesen idő- és hullámhosszfüggő számsorozatokká). A távirányítással, esetleg teljesen autonóm üzemi-
ben működtetett földi és űrteleszkópok soha nem látott adatmennyiséget felhalmozva nyitnak új utakat a csillagászok munkájában.

Jelen cikkben azokról az ún. égboltfelmérő programokról adunk áttekintést, melyek részben az elmúlt tizenöt évben forradalmasították a csillagászati kutatásokat, részben pedig a 2015–2030 közötti időszakban fognak meghatározó szerepet játszani a Tejútrendszerre és az egész Univerzumra kiterjedő vizsgálatokban.

...és módszerei

A csillagászati megfigyelések során jellemzően az égitestekről érkező elektromágneses sugárzást elemezzük térbeli, időbeli

és hullámhosszbeli eloszlása alapján. A csillagászat történetére visszatekintve ismétlődő mintázat rajzolódik ki: a mérés pontosságának, illetve a tanulmányozott minták méretének nagyságrendi növekedésével párhuzamosan történnek az izgalmas áttörések, az új fizikai jelenségek felfedezései.

Az égboltfelmérés módszere nagyon hosszú múltra tekint vissza. Hipparkhosz ókori görög csillagász volt az első, aki az i.e. II. században csillagkatalógust állított össze a szabad szemmel látható állócsillagok alapján, feljegyezve legalább 850 csillag égi koordinátáit és fényességét. Noha a pozíciók és a fényességek nagyon kis pontosságúak voltak, mégis lehetőséget adtak hosszú időn át észrevehető jelenségek felfedezésére (mint pl. a Föld forgástengelyének a precessziója, amit már maga Hipparkhosz is felismert, illetve a csillagok sajátmozgása, amit Edmond Halley fedezett fel 1720-ban, felhasználva Hipparkhosz méréseit is). A nagyságrendileg ezres darabszámú csillagkatalógusok egészen a XIX.

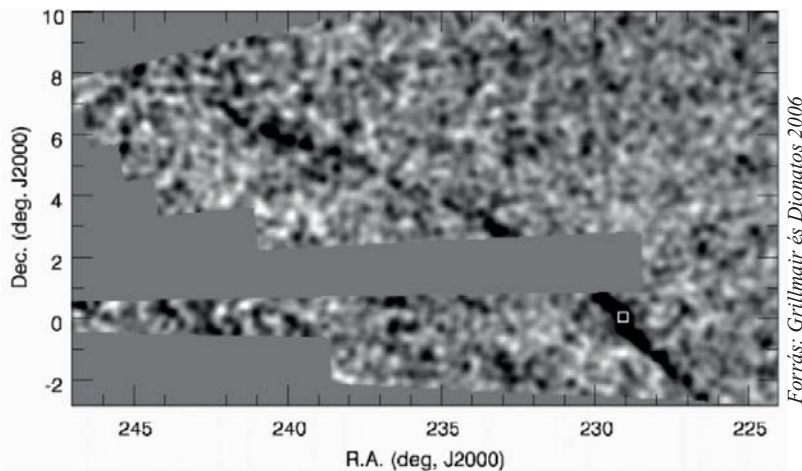
század második feléig nem bővültek drámaian. A fotografikus technika alkalmazása előtti utolsó, vizuális észleléseken alapuló nagy felmérés a Bonner Durchmusterung (BD) volt, amelyet Friedrich Wilhelm Argelander német csillagász kezdeményezett 1859-ben, az adatgyűjtés és a katalógus frissítése pedig egészen 1903-ig tartott a világ számos obszervatóriumának közreműködésével. Amellett, hogy a BD közel félmillió objektumot tartalmazó csillagkatalógusa mindmáig használt referenciamű, ez volt az az adathalmaz, amely a frissen kidolgozott sztellarstatisztika módszereivel lehetővé tette az első realizisztikus becsléseket a Tejútrendszer méretére (Jacobus Kapteyn és Hugo von Seeliger, 1898 és 1920 között párhuzamosan).

Az 1950-es években készült el az első „fotó” a teljes északi égboltról, amihez a Palomar Observatory Sky Survey (POSS) programjának keretében készültek nagylátószögű fényképek. Az 1970-es években a déli éggel is kibővült a minta, az 1980-as években pedig újrafényképezték az egész eget, az érzékenyebb fotóanyagoknak köszönhetően halványabb égitesteket is megörökítve (POSS-II).

Az eredeti formájában közel ezer fotólemezből álló „égbolthalom” nehezen kezelhető, egy teljes szekrényt megtöltő gyűjteménye évtizedekig a legfontosabb referencia volt, ha például hirtelen feltűnt egy „új” csillag az égen és ellenőrizni kellett a korábbi állapotot ugyanazon a pozíción. Az 1990-es években megtörtént a gigantikus fotografikus anyag digitalizálása, ez volt a Digitized Sky Survey (DSS): a szélessávú internet előtti korszak utolsó nagy digitális csillagászati adatbázisa, amelyet 102 CD lemezen lehetett megvásárolni. Természetesen a web fejlődésével a DSS az első között került fel mindenki számára elérhető, lekérhető, lementhető formátumban az internetre.

A DSS valódi forradalom volt a mozgó és tranziens égitestek kutatásában. Mindmáig egy csillagászati felvételen véletlenül feltűnő üstökös, felfényesedő (elhalványodó) csillag, gigászi kitörésen áteső aktív galaxismag esetén a legelső ellenőrzést a DSS-fotói jelentik, amelyek koordináta alapján másodpercek alatt lekérhetők.

A beszkennelt fotók grafikus megjelenítése mellett az ezredfordulóra megtörtént a korábbi évtizedek több ezer fotólemének szkennelése és automatikus objektumazonosítása. A US Naval Observatory munkatársai által kiadott USNO-B1.0 katalógus mindaddig a legnagyobb csillagkatalógus, amelyben több mint 1 milliárd egyedi égitest koordinátái és azok változásai (ha ismeretek), fényességei és csillag/galaxis elkülönítő információi megtalálhatók. A katalógus leghalványabb bejegyzései a szabad szemmel éppen látható csillagoktól kb. 1 milliószor halványabbak.



A Palomar 5 gömbhalmaz árapálynyúlványát a megfelelő színű és fényességű csillagok koncentrációja rajzolja ki

Galaktikus archeológia

Akár fotókon, akár a számokká alakított katalógusokban tanulmányozzuk az égbolt fényességeloszlását, mindenképpen a leglátványosabb és legnagyobb kiterjedésű objektum a Tejútrendszer, a Napot is tartalmazó gigászi csillagváros, kb. 150–200 milliárd csillag otthona. A mintegy 100 ezer fényév átmérőjű anyaggalaxisunk korongja az egész égen átívelő halvány fénylésként látható holdmentes és fényszennyezéstől megkímélt derült éjszakákon.

A digitális égboltfelmérések megjelenésével egy új tudomány született a csillagászatban belül, ez az ún. galaktikus archeológia. Az alap gondolat igen egyszerű: amennyiben képesek vagyunk beazonosítani a Tejútrendszer legősi komponenseit, illetve az azokat befolyásoló fizikai-kémiai folyamatokat, akkor a nagy vöröselőldadás, azaz kozmikus távolságokon található extragalaxisok lokális megfelelőit tanulmányozhatjuk. A helyi vizsgálatok előnye, hogy sokkal részletesebbek lehetnek, mint amit valaha is remélhetünk a milliárd fényévnyi (idő- és térbeli) távolságokkal elválasztott galaxisok esetében.

Az ötlet már nagyon régen megjelent a csillagászati szakirodalomban, de valódi kibontakozásra csak az utóbbi években kerülhetett sor. Olin Eggen, Donald Lynden-Bell és Allan Sandage amerikai csillagászok 1962-ben fedezték fel, hogy a csillagok kora és térbeli mozgása meglepő összefüggést mutat. 211 törpecsillag térbeli sebességeit meghatározva kimutatták, hogy a fiatalabb égitestek közel körpályán mozognak a Tejútrendszer magja körül, az idősebbek pedig elnyúlt, erősen elliptikus pályákat követnek. Mindebből a kutatók arra következtettek, hogy a Tejútrendszer anyaga a korai Világegyetemben erős összezuhánáson ment keresztül, aminek az időskálája százmillió éves nagyságrendbe esett.

Az azóta eltelt évtizedek sokat finomítottak a képen, és ma inkább az az uralkodó nézet, hogy a Tejútrendszer nagyléptékű anyagbefogás révén, illetve kisebb galaktikus építőkockák összeolvadásával épült fel. A galaktikus archeológia célja az egykori „tejút-legók” beazonosítása, az egyedi összetevők kémiai összetétele és mozgásvi-szonyai alapján rekonstruálni a múltbeli folyamatokat. Ahhoz azonban, hogy ezt megtehessek, ma már nem elég százas elemszámú mintákat vizsgálni és itt kerülnek képbe az égboltfelmérési technikák.

A 2000-es évek: 2MASS és SDSS

A látható fény tartományában készült fotókon sötét sávokat látunk a Tejút síkjában. Ezek a fényelnyelő csillagközi porfelhők, amelyek nagymértékben megnehezítik a Tejútrendszer szerkezetének feltárását. Más a helyzet, ha az optikai helyett a közeli infravörösben készítünk felvételeket: például 2,2 mikrométer hullámhosszon a porfelhők fénygyengítő hatása alig tízeze a látható fényben tapasztalhatóhoz képest, azaz feltérképezhetővé válnak a porfelhők mögött található csillagok, csillaghalmazok.

Ezen a területen mindenképpen a legnagyobb hatású program a 2 Micron All Sky Survey (2MASS) volt, ami két db 1,3 m-es dedikált teleszkóppal felmérte a teljes eget Arizonából és Chiléből. Az 1997 és 2001 közötti adatgyűjtés után 2002-ben publikálták a 300 millió csillagot és 1 millió kiterjedt égitestet tartalmazó 2MASS katalógust, ami a galaktikus archeológia egyik fontos kiindulópontja lett. Noha térbeli távolságokat természetesen nem tartalmaz a 2MASS adatbázisa, mindenképpen a legteljesebb felmérést tette lehetővé a Tejútrendszer fősíkjá és centruma irányában. A teljes ég homogén lefedettségének köszönhetően viszont kirajzolódtak egyes elnyelt

törpegalaxisok csillagáramai, amelyeket a 2MASS adataiban az égen átnyúló, hasonló színű és fényességű vörös óriáscsillagok koncentrációi jeleznek.

Utóbbi témában, vagyis az egykori galaktikus építőkockák maradványainak felismerésében a Sloan Digital Sky Survey (SDSS) program volt mindeddig a legeredményesebb. A magyar kutatók meghatározó szerepével megvalósult felmérés (Szalay Sándor a Johns Hopkins University-n, Csabai István, Frei Zolt és tanítványai az ELTE-n) célja valójában a távoli galaxisok felmérése volt az új-mexikói Apache Point obszervatórium 2,5 m-es távcsövével, ám a speciális műszerekkel felszerelt teleszkóp több mint 100 millió csillagról is szolgáltatott égi koordinátákat és öt színben mért fényességeket.

A kulcs a szín és a fényesség egyidejű ismerete: az azonos korú és összetételű csillagcsoportosulások jól definiált összefüggést mutatnak a szín függvényében ábrázolt fényesség síkjában. Ezért aztán, még ha szét is szóródtak a kialakulásuk óta, az ügyesen vizsgált szín- és fényességs adatokból kideríthető térbeli eloszlásuk. Így sikerült felfedezni pl. a Palomar 5 jelzésű gömbhalmaz több mint 10 fok hosszú árapálynyúlványait, amelyekben a csillaghalmazból a Tejútrendszer gravitációs vonzereje által kitepott csillagok keringenek a halmaz előtt és mögött. Főleg az SDSS csillagkatalógusa alapján ma már több mint egy tucat galaktikus csillagáramot ismerünk, amelyek létezéséről még csak nem is sejtettünk korábban. Ezek részben csillaghalmazok, részben pedig egykori törpegalaxisok maradványai, melyeket a Tejútrendszer több milliárd évvel ezelőtt elnyelt, ma pedig a galaktikus kannibalizmus hívívőiként szóródtak szét a Tejútrendszert gömbszimmetrikusan övező galaktikus halóban.

A 2010-es évek: Gaia...

Az égi irányokat jelző koordináták és fényességek teljes értelmezéséhez nélkülözhetetlen információ a vizsgált égitestek távolsága. Ez azonban kemény dió (annyira, hogy a szerző egy komplett szemesztert képes megtölteni a kérdéssel csillagász szakos egyetemistáknak). A térlátásunkat is biztosító parallaxis-effektus lényege a két különböző helyről történő észlelés, ami a közelebbi objektumokat más irányban mutatja, mint a távolabbiakat. A látszólagos elmozdulás az ún. parallaxiszög, ami fordítottan arányos a távolsággal.

A modern asztrometria, azaz csillagászati pozíciómérés már régen kiköltözött a világűrbe. 1989 és 1993 között működött a Hipparcos műhold (High-Precision PARallax COLlecting Satellite), amely mintegy 120 ezer csillag távolságát határozta meg kb. 1000 fényévnyi térrészen belül. Ennek

A számokká alakított fény

utóda a Gaia űrobszervatórium, az Európai Űrügynökség jelenleg működő legnagyobb tudományos űreszköze.

A mintegy két tonnás Gaia 2013. decemberében került a Földről kb. másfél millió km-re található pályájára, amelyen a Földdel együtt kering a Nap körül. A lassan forgó tóruszra épített két teleszkóp folyamatosan szkenneli a látómezőn áthaladó égitesteket és az áthaladás időpontjából válik kiszámíthatóvá a pontos égi koordináta. Egy év alatt a Nap körüli keringés miatt fellép a parallaxis-hatás, azaz a közelebbi csillagok parányi elmozdulása a háttér égitestjeihez viszonyítva. A tervek szerint öt évig folyamatos adatgyűjtés alatt kimérhetővé válik kb. 1 milliárd csillag pontos távolsága, illetve térbeli mozgásukat tükröző sajátmozgásuk.

A magyar kutatókat is foglalkoztató Gaia-program (*Szabados László* és munkatársai, MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont) igazi precíziós asztrofizikát tesz majd lehetővé. Az előzetes becslések szerint 1%-os pontosságú távolságot szolgáltat 10 millió csillagra 8 ezer fényéves távolságig, 10%-os pontosságú távolságokat pedig 100 millió csillagra 80 ezer fényévig. A Gaia akár milliomod ívmásodpercnyi pontosságú koordinátáiból még a legközelebbi kísérőgalaxisaink, a Magellán-felhők távolsága is meghatározhatóvá válik.

A galaktikus archeológia szemszögéből a Gaia hatása fantasztikus lesz. Mivel egy speciális műszerrel még színeképeket is mér, ezért az ötödik év végére képes lesz a csillagok látóirányú sebességének meghatározására a Doppler-effektuson keresztül. Százmillió csillagból, amelyeknek ismert a három tér- és a három sebességekkoordinátája, már felépíthető egy olyan valós Tejútrendszer-modell, amelyben az időt tetszőlegesen léptethetjük előre és hátra, majd a mozgásegyenletek megoldásával kiszámíthatjuk galaxisunk múltját és jövőjét! Persze amíg ez megvalósul, sok elektron lefolyik még számítógépeink elektromos csatlakozóin, ám elvben a lehetőség ott lesz a 2020-as évek elején.

A Gaia legelső adatai 2016 második felében kerülnek nyilvánosságra, de a valódi eredmények majd a teljes program lefutása után elkészülő adatbázisból születhetnek meg.

...és színeképek milliói

Koordináták, színek, fényességek, távolságok és sebességek – mind nagyon hasznos szám, ami jellemez egy csillagot, ám az igazi finom részletek a kémiai összetételből deríthetők ki. Ennek meghatározásához viszont kellően nagy felbontású színeképek szükségesek, melyekben az egyedi kémiai elemek „ujjlenyomatait”, a színeképvonalak kimérhetők, modellezhetők.



A 3,9 m-es Australian Astronomical Telescope a Siding Spring-i Obszervatóriumban (Fotó: AAO)

A periódusos rendszer elején találjuk az Ősrobbanás által létrehozott hidrogént és héliumot, az Univerzum két leggyakoribb elemét. Noha a csillagászatban elterjedt az elemek hiperegyszerűsített felosztása hidrogénre, héliumra és a „fémekre”, azért vannak sokan, akik egyedi elemgyakoriságokkal is foglalkoznak. A csillagokban zajló nukleoszintézis, a nehezebb atommagok létrehozása fúziós reakciókkal, alapvetően más a kistömegű és a nagytömegű csillagokban, illetve nagyon sok nehéz elem szupernóva-robbanásokban termelődik. Ennek megfe-

lelően a hasonló eredetű csillagok felismerhetők a finom kémiai összetétel azonosságai alapján is.

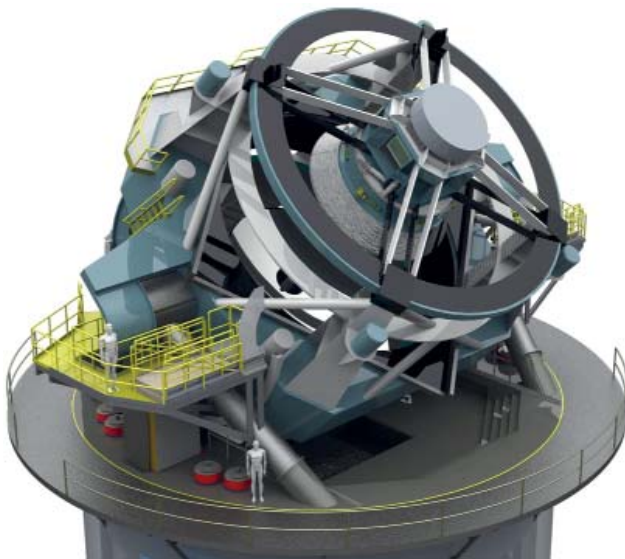
A kémiai nyomjelzés technikája alapvető fontosságú módszer a galaktikus archeológiában. Méréstechnikailag azonban nagyon nem triviális több ezer, tízezer, százezer csillagról homogén színeképeket készíteni. Az áttörést az ún. multiobjektum-spektroszkópia (MOS) hozta el. Ennek lényege, hogy egy közepes-nagy (4–8 m-es tükörátmérőjű) távcső főtükörének fókuszsíkjaiba elhelyezünk egy nagy lemezt, ahonnan precízen elhelyezett fénycsatoló mikrolencsék optikai szálak segítségével elvezetik a fényt egy spektrográfhoz, ami az egyedi optikai szálaokról érkező fénynyalábokat színeképekké bontja. Egy-egy tartólemezen akár több száz, vagy ezer mikrolencsét pontosan pozicionálva egy adott égiterről egyszerre több száz, vagy ezer csillagról, galaxisról készíthet szimultán színeképet.

A terület egyik vezető intézménye az Ausztrál Csillagászati Obszervatórium, amelynek 3,9 m-es teleszkópja az AA-Omega multiobjektum-spektrográffal egyszerre 350–400 objektumról képes színeképeket rögzíteni. A közelmúltban üzembe állított HERMES spektrográffal indították el az ausztrál kutatók a GALAH programot (GALactic Archaeology with HERMES), amelynek célja egymillió csillagra 15 különböző kémiai elem gyakoriságának meghatározása. A több évig tartó adatgyűjtés végén mindaddig páratlan lehetőség nyílik az asztrometriai és a kémiai információk kombinálására.

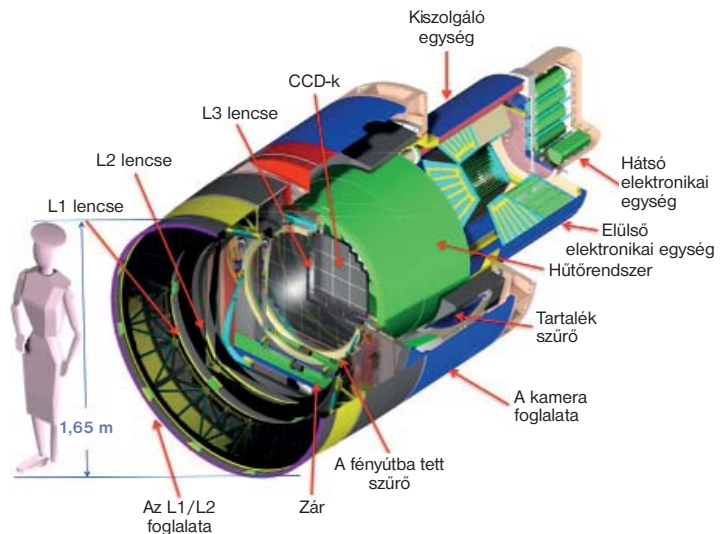
Jelenleg mintegy tucatnyi MOS működik, vagy áll megépítés alatt legalább 300 optikai szállal. Legerősebb magyar vonat-

Az AAT fókuszsíkjaiban mikrolencsék csatolják a fényt a 36 m-es hosszúságú optikai szálakba, amelyek a teleszkóp alatti helyiségben található színeképelemző berendezésig továbbítják a csillagok fényét (Fotó: AAO)





Látványterv a 8,4 m-es főtükörű LSST-ről
(Forrás: LSST)



Az LSST fókuszsíkjaiban egy közel három tonnás optikai-mikroelektromos remekmű fogja a fényt számokká alakítani (Forrás: LSST)

kozásai a kanári-szigeteki WEAVE projektnek vannak, amely 1000 optikai szálal MOS-t épít a 4,2 m-es William Herschel-teleszkóp primér fókuszába. A nemzetközi konzorciumban az MTA CSFK kutatói és műszerépítői dolgoznak, a tudományos program kidolgozásán és speciális optikai tervezési feladatok megoldásával.

A 2020-as évek: LSST

Az összes eddig említett felmérés lényegében egy pillanatképet szolgáltat. A Gaia ugyan évekig mér minden égitestet, de ez szükséges is a parallaxis-méréshez; a Gaia átlagosan 70–80 alkalommal fog visszajárni a csillagokhoz, ami öt év alatt nem túl bőséges mintavételezés.

Az időtartományt is lefedő égboltfelmérő programok természetesen léteznek, elég csak a gravitációs mikrolencsékre vadászó felmérésekre utalni az 1990-es évektől (MACHO, OGLE, EROS). Azonban a teljes égboltot lefedő, folyamatos és mély felmérés mindaddig még nem valósult meg. A Large Synoptic Survey Telescope (LSST) programja viszont éppen erre vállalkozik: egy 8 m-es főtükörű óriásteleszkóppal 10 éven keresztül fog adatokat gyűjteni a Chiléből látszó teljes eget lefedve; az évtize-

des méréssorozat végén mintegy 20 milliárd objektumról lesz ezer egyedi mérési pont, úgy, hogy háromnaponta a teljes látzó eget végigszkenneli a műszer.

A mintegy 1 milliárd dolláros költségű LSST az Univerzum első színes, digitális mozgóképét fogja elkészíteni és a 2020-as években mindenképpen forradalmi változásokat okoz az optikai csillagászatban. Ahhoz, hogy erre képes legyen, minden szempontból különleges műszer lesz. Speciális optikai elrendezésének köszönhetően 8,4 m-es főtükre mellett is 3,5 fokos látómezőt rögzít (ez hét telihold átmérője), amihez egy közel három tonnás, 3,2 gigapixeles CCD-mozaik lesz a digitális kamera.

A minden túlzás nélkül minden idők legambiciózusabb csillagászati projektjének a legkritikusabb eleme a szoftverrendszer. Az adatfolyam napi 20 terabájt feldolgozását fogja igényelni, míg a tizedik év végére 100 petabájt adat születik meg. Ekkora adatmennyiséget a jelenlegi eszközeinkkel lehetetlen feldolgozni, így az LSST sikeréhez nem csak mérnökökre és optikusokra, hanem csillagászok, fizikusok és programozók összehangolt együttműködésére is szükség lesz.

Az LSST tudományos programja gyakorlatilag a teljes csillagászatot lefedi. Címzavakban a főbb témák:

- sötét anyag és sötét energia, kozmoló-

gia (galaxistérképek, szupernóvák, kvazárak);

- időtartománybeli csillagászat (tranzitensek, változócsillagok);
- naprendszeri égitestek (kisbolygók, üstökösök, Neptunuszon túli objektumok, Oort-felhő);
- a Tejútrendszer szerkezete (csillagpopulációk).

Természetesen a legutolsó pontban megtaláljuk a galaktikus archeológiát is, ami- ben az LSST a Gaiahoz hasonló hatású lesz.

Az LSST már épül Chilében, Magyarországról pedig két kutatócsoport formálisan is megállapodott az LSST konzorciummal a tudományos együttműködésről (Frei Zsolt, ELTE; Kiss László, MTA CSFK).



A szerzőtől több alkalommal megkérdeztek már, hogy na de, mi újdonság lehet még a csillagászatban, amikor ott van a Hubble-űrtávcső és a 8–10 m-es földi óriások gar- madája. Remélem, olvasóimnak sikerült be- mutatni, hogy a csillagászat fényes jövő előtt áll, amelynek formálásában kutató- ként részt venni páratlan szakmai élmény. A pályaválasztás előtt álló tehetséges diá- kokat pedig azzal biztatnám, hogy munka az lesz bőven a szakmánkban...



A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia és a Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala támogatásával készült



Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala

KOLLÁTH ZOLTÁN

Történetek a fényszennyezésről

Szükségünk van sóra és cukorra. De belőlük is megárt a sok. Az izzadástól elvesztett só pótolnunk kell, de nagy mennyiségben akár mérgező is lehet a bevitele. Nem élhetnénk napfény nélkül – fontos D-vitamin forrásunk a központi csillagunk fénye, de ha túlzásba visszük a napozást, rögtön leégünk, és komoly következménye lehet az ibolyántúli sugárzásnak. Mai életstílusunkban már az éjszakát sem túrnék fények nélkül. Természetessé vált, hogy a mesterséges fények, a világítás ott van mindenhol. Sokaknak komoly problémát okozna, ha hirtelen elcsótotédnének városaink. Ám a mértéktelenség a fény esetén is gondot okozhat környezetünknek, de akár a saját egészségünknek is. Ma már egyre ismertebb a fényszennyezés fogalma. 2012 augusztusától jogszabályi definíció is létezik: „*Fényszennyezés*: olyan mesterséges zavaró fény, ami a horizont fölé vagy nem kizárólag a megvilágítandó felületre és annak irányába, illetve nem a megfelelő időszakban világít, ezzel káprázást, az égbolt mesterséges fénylését vagy káros élettani és környezeti hatást okoz, beleértve az élővilágra gyakorolt negatív hatásokat is.” – 253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet az országos településrendezési és építési követelményekről (OTÉK).

Akár le is egyszerűsíthető a fényszennyezés fogalma, ha a légszennyezésre alkalmazott definíciót használjuk, például a levegő védelméről szóló 306/2010. (XII. 23.) Kormányrendelet alapján: „*Légszennyező anyag*: a levegőben lévő, és az emberi egészségre vagy a környezet egészére valószínűsíthetően káros hatást gyakorló anyag; *légszennyezés*: légszennyező anyag kibocsátási határértéket meghaladó mértékű levegőbe juttatása”. A fény is anyag, a fotonok a részecskéi, így akár a légszennyezésre vonatkozó meghatározás közvetlenül is alkalmazható a fényszennyezésre is. Persze mint sok más esetben, a légkörben lévő fotonok közül sem mondható meg egyértelműen, hogy melyik a szennyező. A szén-dioxid is a légkör természetes alkotója, nélkülük nem létezne a növényi élet többsége. Szükség van szén-dioxidra természetes mértékben. Egy molekuláját kiválasztva a levegőből nem tudjuk eldönteni, hogy a jó vagy a rossz kategóriába soroljuk... Éjszaka az égbolt irányából érkező fotonról sem tudjuk, hogy az természetes eredetű, pl. egy csillag ragyogása vagy egy az égbolt irányába célzott reflektor légkörről visszaszóródó fénye. Sokszor éppen ez a probléma: a fényszennyezés nem különül el a hasznos jeltől. De erről még lesz szó a későbbiekben.

Az OTÉK meghatározásából is látszik, hogy a fényszennyezés összetett jelenségkör. Érdemes külön-külön megvizsgálunk, mit takar ez a fogalom.

A kozmikus fény végzet

A Fény Nemzetközi Évének az egyik központi eleme a kozmikus fény. Érdemes tehát kicsit körbejárnunk ezt a témát. De mi is a kozmikus fény? Minden, ami a kozmoszból érkezik és látható. A csillagok és a bolygók fénye, a csillagközi ködökről és a galaxisokról hozzánk érkező fotonok. A Tejút sávja az éjszakai égbolton, amely maga is csillagok millióinak az együttes derengése, a kozmikus fény egyik leglátványosabb megjelenése. Sajnos a végzet nagyrészt már beteljesedett: a középiskolát befejező városi gyerekek jó része már úgy nőtt fel, hogy nem találkozott még a Tejút látványával. De miért is nem?

A fény könnyedén kölcsönhatásba kerül az anyaggal, ezért a fénysugarak egy része elnyelődik vagy szóródik a közegben. Ez utóbbi jelenség folyamán a fény részecskéi nem tűnnek el, mindössze irányt változtatnak. Ez aztán sok kalamajkát okoz a kozmikus fény életében... A fényszórás sokszorosan is előkerül a kozmikus fény történetében. Azoknak a fotonoknak az életútja, amelyeket a természetes éjszakai égbolton láthatunk, valahol a csillagok mélyén indult. A csillagok magjában zajló energiatermelés, amikor a hidrogéntől kiindulva felépülnek az egyre nehezebb atommagok, fotonok kibocsátásával jár.



Kozmikus fény: csillagok, a Tejút sávja, az Androméda-köd és kilenc Perseida meteor nyoma 2015 augusztusában a Zselicből

A megtermelt energiát szállító fotonok születésük pillanatában még nem tekinthetők fénynek, hiszen hullámhosszuk lényegesen rövidebb, mint a látható tartományba eső elektromágneses sugárzásé. Láthatóvá válásukig sok idő telik el. Nem tudnak ugyanis egyenesen kirepülni, terjedni a csillag mélyéről, hiszen az ott lévő közeg majdnem teljesen átlátszatlan. A csillag mélyén a gáz plazma állapotú, az atommagok és az elektronok külön életet élnek. Furcsa módon az elektronok azok, amelyek leginkább kölcsönhatásba kerülnek a fotonokkal. Az elektromágneses sugárzás szóródik az elektronokon. Vákuumban és híg közegben a fény egyenes vonalban terjed. Ez történik a csillagban keletkezett fotonokkal is, de az egyenes út többnyire csak egy milliméternyi, vagy még rövidebb szakaszra terjed ki. Ekkor következik be a kölcsönhatás az elektronokkal, azokon szóródva a foton más irányba halad tovább. A fény útja véletlen irányú, rövidke szakaszokból tevődik össze.

Ha egyenes vonalban távozna a fény egy a Napunkhoz hasonló csillagból, akkor mindössze két másodpercre lenne szükség ahhoz, hogy a magból indulva elhagyja a csillag felszínét. Az imént említett véletlen bolyongás azonban rendkívül elnyújtja ezt az időtartamot. Két másodperc helyett százezer éves nagyságrendű időszak az, amíg a fotonok az égtest belsejében bolyonganak. Az elindult foton – pontosabban annak utódai, mert a kölcsönhatások folyamán folyamatosan alkalmazkodnak a környezet hőmérsékletéhez, míg a felszínen már a látható fény tartományába kerülnek –, gyakorlatilag bejárja a csillag teljes belsejét. Ez elsőre meglepő,

de ezzel jár, ha a fény 100 ezer fényévnyi utat tesz meg egy két fénymásodperc méretű gömbben...

A csillagot elhagyva a fény már viszonylag könnyedén halad – jó esetben a Földig tartó pár évtől néhány ezer évig terjedő utat ütközésmentesen megteszi. Persze van olyan kozmikus fény, amely már közvetve érkezik hozzánk a csillagoktól. A Fiastyúk csillagai jelenleg egy gázfelhőn haladnak keresztül. A csillagfény megvilágítja a ködöt és az arról irányunkba szóródó fény jellegzetes kék színben ragyog – ami nem más, mint a csillagok színe. A köd fehérnek számít ebből a szempontból. Az Orion-köd kékesen fénylő részei a Fiastyúk felhőihez hasonlóan a fiatal kékes csillagaitól kapják a színüket. A vörös fény is a csillagoktól ered, de ez már nem csak tiszta reflexió: a nagy energiájú fotonok gerjesztik a hidrogént, és az elemre jellemző piros színképvonal határozza meg a látványt. Az Orion-köd fénye kb. 1500 évet utazik, amíg elérkezik hozzánk. A Tejút derengése még hosszabb utat tesz meg szemünkig – 10 ezer fényéves távolságkálá jellemzi azon csillagok távolságát, amelyeket külön-külön nem láthatunk szabad szemmel, de együttesen a jellemző fénylést adják.

A Tejút fénylő sávjából egy teleholdnyi égrésről pár ezer foton érkezik egy másodperc alatt a pupillának megfelelő területre a légkör külső részén. Az éjszaka a pupillán átjutó fotonoknak azonban mindössze a tizede ér el egy pálcikába, azaz másodpercenként mindössze pár száz foton lesz az, ami a Tejút derengését láthatóvá teszi számunkra. A látásunk felbontását is figyelembe véve egy-egy elemi „pixelre” még kevesebb fény esik.

Itt érdemes kicsit összefoglalni az előzőket: a fény pár százezer évet bolyongott a csillag belsejében, utána még akár jó pár ezer évet utazott a csillagok között, míg elérkezett a földi légkörig. Egy-két tucatnyi foton egy másodperc alatt már könnyen érzékelhető ingerületet okoz a recehártya érzékelő sejtjeiben, ennél kevesebb is elég a fényérzethez. Azonban itt következik a légkör, amely felhős időben mindent elnyel és derült időben is áldozatul esik minden 4–5. foton a levegő molekuláin, a párán és a mindenféle egyéb részecskéken (aeroszolon) történő szórás „jóvoltából”. Még mindig maradna elegendő bőven ahhoz, hogy lássuk szabad szemmel is a Tejutat vagy az Orion-ködot. De a verseny a láthatásért igazából akkor kezdődik, amikor máshonnan származó fotonok is megjelennek az éjszakai égbolton.

A csillagok belsejében a fotonok néhány millimétert tesznek meg két szóródás (ütközés) között. A földi légkörben ez közel 10 km. Lényegesen nagyobb távolság, de a földfelszínről távozó fény jelentős része még így is „összefut” egy szóró részecskével, és többnyire visszajut a felszínre. Az égbolt a mesterséges fények hatására kivilágosodik. A városokban egy teliholdnyi égrésről tízezer, vagy akár ennél is lényegesen több foton érkezik egy másodperc alatt – ezzel kel versenyre a kozmikus fény pár száz fotonja. A hosszú út után ez lesz a végzete. A városlakók számára már elveszett a Tejút, az Orion-köd vagy az Androméda-galaxis látványa...

Szeretnének egyenesen repülni...

Évmilliókon keresztül a környezet megvilágítását a Nap és a Hold változása határozta meg. Kiválasztódtak azok a lények, amelyek nappali fényben aktívak, és azok, amelyek főleg az éj leple alatt keresték meg táplálékukat, vadásztak vagy éppen a ragadozók elől rejtőzködtek el a sötétben. A Hold is központi szerepet játszott az éjszakában, lényegesen megnövelve az életterek megvilágítását. A Naphoz hasonlóan a Hold is fontos tájékozódási pontot jelentett. Nagyon sok faj számára lényeges az, hogy „lakóhelyéről” viszonylag nagy távolságokra repüljön élelemért, majd onnan ismét hazajusson. Gondoljunk csak a virágpórét kilométerekre repülő méhekre. Számukra és a többi nappal aktív lénynak a környezetet kellően megvilágítja a Nap, ahhoz hogy a fák és más növények kontúrja, szerkezete kellő tájékozódási alap legyen.

Az égbolt is fényes, így a fényének polarizáltsága iránytűként szolgálhat.

De mi történik éjszaka? Hogyan tájékozódnak például az éjszakai repülő rovarok, amelyek többségben vannak a nappal aktív társaikhoz képest? Egyrészt szemük alkalmazkodott az éjszakai viszonyokhoz. A nappal repülő rovarok összetett szemének egy egysége csak a saját fotoérzékelőjéhez juttatja el a fényt. Az éjszakai repülő rovaroknál részben eltűnt az egységeket elválasztó fal és a lencse úgy módosult, hogy a saját irányától eltérően érkező fényt a szomszédos receptorokhoz irányítsa. A szem felbontóképessége nem növekedett meg ezáltal, de ugyanahhoz a „pixelhez” nagyobb felületről gyűjti a fényt. Ezáltal alkalmassá váltak arra, hogy éjszakai fényviszonyok mellett is megtalálják legelőjüket vagy éppen prédájukat. A tájékozódáshoz csak néhány szabályt használhattak: a Hold lassan mozog az égen, irányja pedig – nagy távolsága miatt – független attól, hogy éppen milyen messzire repültek. Kiváló tájékozódási pont. Az éjszakai égbolt is jelentősen fényesebb, mint a talaj vagy a növénytakaró.



A rovarok temetője. Ez a helyszín a településektől távol található, az éj közepén emberek nem igazán látogatják. De a fényvető működik, így rovarok nagy számban érkeztek és estek csapdába. A kis kápolna is szebb lenne a csillagok és a Hold természetes fényében

Ha baj van, akkor a világos felé kell repülni – ott szabad a mozgás, nem kerül semmi az útba. A Hold és így bármilyen fény látványa egyben a szabad útvonalat is jelzi. Ezek lehetnek a fő tényezők – és valójában nem is ismerünk még mindent pontosan – amelyek arra vezetnek, hogy az élőlények egy része vonzódik a fényhez, azaz fototaxisuk pozitív. A történetben az a szomorú, hogy nem származik haszna a rovarnak abból, ha minden fényhez vonzódik. Gondoljunk csak azokra a rovarokra, amelyek akár a gyertyafénybe is berepülnek, és ott elégnek...

A pozitív fototaxis egyik érdekes formája az, amikor lényegében nem is a fény irányába repül a rovar. A tényleges célja az lenne, hogy egyenesen repüljön. Évmilliók alatt rögződött DNS-ében is, hogy a Hold fényét meghatározott irányban tartva röppályája egyenes lesz. Ennek segítségével eljuthat egy másik legelőhelyre, vagy éppen visszaérhet pihenőhelyére. Szemük felbontása nagyon is korlátozott – egy koncentrált fény az éjszakában a Hold képzetét kelti bennük. De mit okoz egy közeli fényforrás? Haladási irányukat és a fényforrás irányát bezáró szöget állandónak tartva a rovar spirális pályán közeledik a fényforráshoz, esetleg még mielőtt azt elérné, zavaros körpályára áll. Mindannyiunk számára ismerős ez a látvány a lámpa körül röpködő rovarokról.

Egy másik lehetséges folyamat a fénycsapda létrejöttére az, hogy amint az embernél is tapasztalható, erős fény hatására átme-



Szentjánosbogarak rajzása a szürkületi erdőben. Számukra a természetesen megvilágított környezet azért is fontos, mert saját fényüket használják a párkeresésben. A fényszennyezés a szaporulat elmaradásával is járhat

netileg csökken a szem érzékenysége. Próbál ugyan eltávolodni a fénytől a rovar, de miután sötétebb térbe jut, ideiglenesen csökkent látóképességével ismét a látszólagos biztonságot választja és visszatér a világítás irányába. Sok repülő éjszakai lepke egyszerűen leszáll egy megvilágított területre, mert a látvány azt a képzetelt kelti, hogy elérkezett a nappal, a pihenés ideje. Az eddigiekben emlegetett hamis pozitív fototaxis végeredménye minden esetben az, hogy csökken, vagy teljesen megszűnik az az időtartam, amely az élelem megszerzésére vagy éppen a szaporodáshoz szükséges pár megtalálásához kell. Hogy milyen erős ez a hatás, az az elpusztult egyedek ezreivel, kiloival vagy éppen tonnáival mérhető. Számos példát találhatunk erről az egyre gyarapodó szakirodalomban.

Elmulasztott lehetőségek

A technológia fejlődése többnyire hasznunkra válhat, például azáltal, hogy javul a határfok, ugyanazt a munkát vagy megtett távolságot kevesebb üzemanyaggal is elérhetjük. A világítás történetében is többször átestünk forradalminak tekinthető fejlődésen. A gyertyafény nagyon drága volt, az igazi fényűzést csak az uralkodók engedhették meg maguknak. Érdekes megnéznünk Adolph Menzel „Nagy Frigyes fuvolakoncertje Sanssouci-ban” című festményét. A kor emberének igazi ragyogást jelentett egy ilyen világítás, amit a festmény nagyon szépen illusztrál. A díszes csillár húsz gyertyája azonban mai szemmel már nem jelent óriási fényt. A ma embere már panaszkodna, ha ekkora megvilágítás lenne egy koncerten – legfeljebb karácsonyi hangulatra lenne elegendő. Egy hagyományos 25 wattos izzólámpa elegendő lenne a gyertya kiváltásához... De ha belegondolunk, nem is lenne szükség akkora fényárra, mint amekkorával elkényeztetnek bennünket.

Nem véletlen hogy a gyertyákat leváltotta a gázvilágítás, amit később az elektromos fény szorított ki az utcákról. Az izzólámpa majd egy évszázadon át fejlődött, egyre hatékonyabbá vált – de itt is megvoltak a fizikai határok. Jöttek a higanylámpák, majd ké-

sőbb a kültéren uralkodóvá vált a nátriumlámpák narancssárga fénye. Ez a meleg fény több szempontból is ideálisnak bizonyult – kevésbé vonzotta a rovarokat, mint a higanylámpák hideg fénye, hogy csak egy előnyt említsünk előzetesen. Ezután folyamatosan kezdtek megjelenni útjainkon a fehér színű fényforrások. Az igazi váltásra pedig napjainkban kerül sor.

A legújabb technikai áttörés a félvezető alapú fényforrások, a LED-ek bevezetése a közvilágításba. Az új eszközök óriási előnye korábbi társaikkal szemben, hogy ugyanannyi elektromos energiából tízszer akkora fényerősséget állítanak elő, mint az izzólámpák. Egy valamiről azonban nem szabad elfeledkezni: A fejlesztés folyamata napjainkban nagyon felgyorsult. Hogy mikor vásároljuk meg az új technikát, nem könnyű döntés – sokszor több szempontot is figyelembe kell venni. A LED-ek bevezetésével is ez a helyzet. Nem biztos, hogy jól járt az, aki elsiette a világítási

Nagy Frigyes fuvolakoncertje Sanssouci-ban, Adolph Menzel festménye (1850–52)



rekonstrukciót. Sok esetben az úttörők fizetik meg a rendszer gyermekbetegségeit is, de előfordult olyan eset is, hogy egy kis kivárással már jobb hatásfokú berendezésekkel történhetett volna meg a rekonstrukció, és lényegesen nagyobb megtakarítást érhettek volna el. Az igazi elmulasztott lehetőség napjainkban az, hogy a fényszennyezés lényegesen csökkenthető lenne, ha várunk egy kicsit és kihasználjuk a fejlődés adta tényleges lehetőségeket. Hogy ezt megértsük, ahhoz egy kicsit fel kell idéznünk, amit a látásról tudunk.

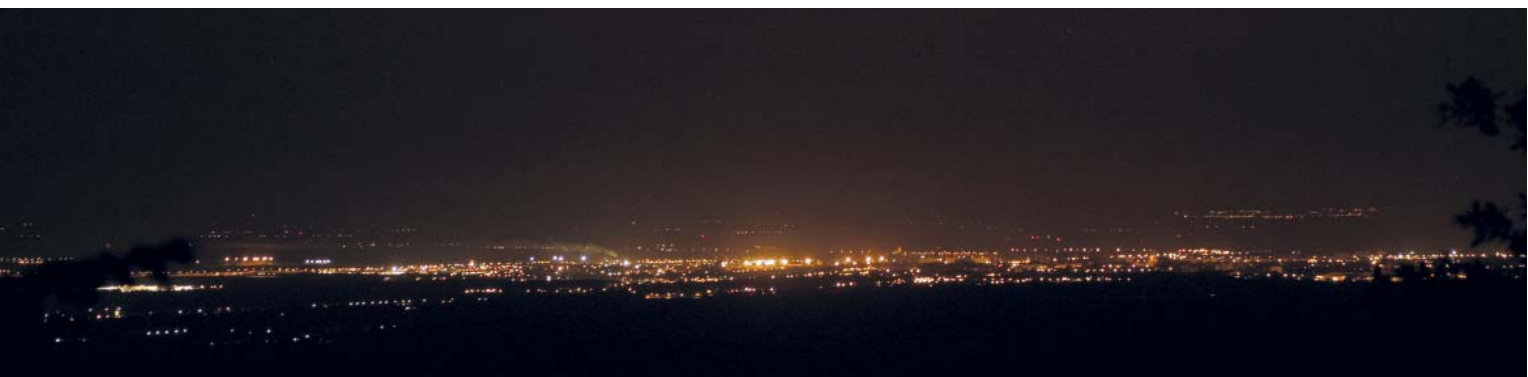


A velemi Szent Vid kápolna – a halszem perspektívájú képen együtt látszanak a templom, és Szombathely fényei. Az alsó kinagyított fotón a város lámpái külön-külön is tanulmányozhatók

Az emberek esetében óriási különbség van a nappali és az éjszakai látás között. Egy bizonyos megvilágítás fölött a szemünkben azok az érzékelők, a csapok működnek, amelyekből három eltérő fajta is van: az inkább vörösre, a zöldre és kékre érzékenyek. Ebből tevődik össze színlátásunk. Azonban szürkületben, ahogy csökken a megvilágítás szintje, a csapok folyamatosan elvesztik érzékenységet, majd nem is vesznek részt a látásban. Szerepüket a pálcikák veszik át, amikből csak egy fajta van. Ezért látunk mindent szürkének éjszaka. Fontos eltérés a nappali és az éjszakai látásunk között, hogy a megvilágítás csökkenésével a szemünk maximális érzékenysége a sárgászöld tartományból a kékeszöld irányba tolódik el. A rovarok szemének érzékenységére is jellemző, hogy a mienkhez képest is a kékesebb tartományba esik a maximuma. Mi következik ebből? Ugyanolyan városi megvilágítás mellett a fehér fény lényegesen jobban vonzza a rovarokat, mint a nátriumlámpák narancsos fénye.

A manapság használt fehér fényű LED-ek igazából egy kék színben sugárzó félvezető eszközökből állnak, amelyet a kibocsátott fotonok egy részének energiáját narancssárga fénné alakító foszforréteg egészít ki. A két színt együttesen fehérnek látjuk – arányuk határozza meg, hogy hideg vagy meleg fénynek érzékeljük a keveréket. Meglepő eredményre jutunk, ha összehasonlítjuk, hogy éjszakai üzemmódban hogyan érzékeli szemünk az eltérő világítást. Hogyan látjuk egy város fénykupoláját, ha a településen belül azonos módon és mértékben világítunk nátriumlámpával és egy közepes árnyalatú fehér LED-del? A pálcikák számára a LED kékes komponense sokkal erősebb ingert jelent, mint a nátriumlámpa narancsos sugárzása. A különbség akár háromszoros is lehet. Az égbolt fénylésének háromszoros növekedése drasztikus hatással lehet a Tejút láthatóságára. Szerencsére ilyen drasztikus romlással nem találkoztunk az itthoni rekonstrukciók folyamán, de ez annak a következménye, hogy a nátriumlámpás lámpatestek általában geometriailag rosszabbak voltak, mint az őket váltó új berendezések. A régi lámpatestek lényegesen több fényt sugároznak az égbolt irányába, közvetlenül a horizont síkja fölé. Ehhez képest a LED világítás egyik fő előnye a jó irányíthatóság, de a fényforrástól függetlenül is az újabb lámpatestekre általában is igaz, hogy jobbak ebből a szempontból, a fény ténylegesen csak oda jut, ahol szükség van rá. Ami rossz volt a régi világításban, azt pontosan akkora mértékben korrigálta az új rendszer, mint amennyire rosszabb lett amiatt, hogy megváltozott a fény színe. A két hatás nagyjából kiegyensúlyozta egymást, így a fényszennyezés szempontjából nem történt nagy változás. Az emberi szem szempontjából talán kicsit javult is a helyzet, de ez valószínűleg nem mondható el a rovarok fénycsapdázása kapcsán...

Ha a környezetvédelmi szempontokat figyelembe vennénk, akkor a meleg fehér, ahol lehetséges a sárgás tónusú világítást kellene előtérbe helyezni. A világítás színét a színhőmérséklettel szokták jellemezni. Érdemes megtanulnunk ezt a fogalmat, mert a háztartásban használatos fényforrásoknál is megadják jó esetben ezt az értéket. Egy forró test színe jó közelítéssel megadható



az anyag hőmérsékletével. A Nap felszíne kb. 5800 K hőmérsékletű – általában ennek megfelelően definiáljuk a fehéret. De az emberi látás egy bizonyos határon belül alkalmazkodni tud a megvilágító fény színéhez, ennek megfelelően meleg vagy hideg fehéreként jellemzünk pl. egy 3000 K és egy 6500 K színhőmérsékletű fényforrást. A nagyobb érték hidegebb, a kisebb pedig melegebb fehéret jelent. A színhőmérséklet fogalma persze ennél összetettebb, mert a modern fényforrások nem az anyaguk hevítésével érik el a fénykibocsátást. Ennek ellenére a színhőmérséklet ebben az esetben is jó közelítéssel meghatározható.

A nemzetközi tendencia ma már az, hogy csak a meleg fehér fényforrásokat tekintik környezetbarátnak. A Nemzetközi Csillagos Égbolt Társaság – amely a csillagászbolt-parkokat is minősíti – 3000 K-ben határozta meg azt a felső határt, ami még megfelel a fényszennyezéstől mentes lámpatesteknek adható védjegyűeknek. Örömteli, hogy 2015 májusában elfogadták Budapest Világítási Mestertervét, amely a főváros egy jelentős részén ugyanezt a 3000 K-es felső határt határozza meg. Városképi szempontból is nagyon fontos a világítás színe: a régi épületekhez sokkal inkább illeszkedik a sárgás tónus, mint a hideg fény. Fontos lenne, ha több város is figyelembe venné a világítási felújításoknál, hogy az alacsonyabb színhőmérséklet sokkal inkább kedvező a fényszennyezés szempontjából. Különösen a védett természeti területek és csillagászbolt-parkok közelében lenne ez fontos.

A fehér LED-ek első generációjánál még nagyobb energia-megtakarítást lehetett elérni a hideg fehér fényűekkel, mit a melegebb tónusúakkal. A tendencia az, hogy eltűnik ez a különbség. Várhatóan a kifejezetten sárgás fényű LED-ekkel is hasonló hatások érhetők el a közeljövőben. Így minden szempontból célszerű lenne a melegebb fényű, és így kevésbé zavaró világítás használata. Az eltérést jól alátámasztja az eddigi mérésekre és modellszámításokra alapozott eredményünk. Ha a jelenleg jellemző nátriumlámpás világítást (aminek színhőmérséklete 2000 K alatti) a jellemzően alkalmazott 4200–4500 K-es színhőmérsékletű LED-ekkel cseréljük le, akkor a már említett kettős hatás miatt jó esetben a korábbi szinten marad a fényszennyezés. Ha ehelyett a kedvezőbb, 3000K-es lámpákat telepítenék, akkor a város fénykupolájának a fényessége a korábbihoz képest felére csökkenne. Sajnos többnyire nem ezt a lehetőséget választják, így az új berendezések elavulásáig várnunk kell az újabb lehetőségekre. Most ezt elmulasztottuk...

Kék fény és az egészségünk

Éjszakai környezetünkben egyértelműen kisebb kárt okozunk a kevesebb kék komponenst tartalmazó világítással. De nemcsak környezetünk, hanem saját egészségünk is nyerne a sárgásabb fényekkel. Az utóbbi évtizedben egyre több vizsgálat született az ember éjszakai érző fény hatásáról. Szemünkkel ugyanis nem csak látunk. A pálcikákon és csapokon kívül még egy fényérzékeny sejt található a retinában, amelyről sokáig nem is tudtunk. Az ezekből a sejtekből származó ingerület az egyik hormon, a melatonin termelését szabályozza. A melatonin éjszaka termelődik, de csak sötétben: amennyiben túlzott mennyiségű fény éri az akár lecsukott szemünket, akkor az inger gátolja a melatonin termelését. Normális esetben éppen ez a folyamat segít a természetes ébredésben, a melatonin segít az alvásban, a reggeli szürkület fényei pedig leállítják a hormon termelését. Az éjszakai sötétre szükségünk van ahhoz, hogy biológiai óránk megfelelően járjon, és kövesse a nap-palok és éjszakák ciklusát. Jobban tudunk pihenni sötétben, mint fényárban.

De nemcsak az álmunk lehet a melatonintermelés elfojtásának az áldozata, mivel a hormon nemcsak a napi ciklusunkat szabályozza, hanem számos egyéb szerepe is van. Csak egy példa: a melatonin sokkal erősebb antioxidáns, mint a C- vagy az E-vitamin. A legmeglepőbb azonban az a tény, hogy a melatonin hiánya nő-

veli egyes daganatos megbetegedések (mell, prosztata, vastagbél és máj daganatai) kockázatát. Több szakmai szervezet, köztük az Egészségügyi Világszervezet (WHO) is, felsorakoztatta a váltóműszakot a lehetséges karcinogén, azaz a daganatos megbetegedések kapcsán kockázatot jelentő tényezők közé. A felváltva éjjel és nappal dolgozó emberek nem képesek megfelelően alkalmazkodni a melatonintermeléssel a változó viszonyokhoz. Több tanulmány talált összefüggéseket a daganatos megbetegedések és a fényszennyezés mértéke között. Még nem tudjuk pontosan, mennyien lehetnek azok, akik a fényszennyezés hiányában egészségesek maradtak volna.

A melatonintermelés elfojtása kapcsán is fontos a fény színe – a kék komponens még inkább káros ebből a szempontból. Már említettük, hogy az éjszakai látásunk érzékenységi maximuma a kék felé tolódik el a nappali látáshoz képest. A melatonin termelését szabályozó érzékelők pedig még inkább a kékben érzékenyek. Ez mutatja igazán, hogy mennyire fontos lenne a világítási rekonstrukciók esetén a lehető legalacsonyabb színhőmérsékletre törekedni. Többek egészsége múlhat rajta.

Zárszó

Az előbbiekből is egyértelműen látszik, hogy milyen sok problémát okozhat a fényszennyezés. Ennek ellenére még napjainkban is sokan elhanyagolják a témát, nem vesznek tudomást róla. A fényszennyezés megoldások sokszor ezen ismeretek hiányával magyarázhatók. Pozitív változást jelentett, hogy az OTÉK-ba bekerült a fényszennyezés fogalma, és rendelet mondja ki, hogy sehol sem szabad fényszennyező módon világítani. A szabályozás ellenére napjainkban is jelennek meg olyan világítási megoldások, amik nemcsak az OTÉK-nak, hanem a józan észnek is ellentmondanak. Egy hangulatos vidéki városunk sétálóutcájában jelentek meg olyan járdába épített fényvetők, amelyek egyenesen felfelé irányulva a házak bejáratait világítják meg. Igazi funkciója nincs – a házból kilépő vagy éppen a kulcslyukat kereső lakókat elkápráztatja, tehát csak kárt okoz. Nem mondható szépnek, esztétikusnak sem. Mégis megszülethetett, valószínűleg a megfelelő ismeretek hiánya miatt. Van még mit tennünk.

Sok esetben a fényszennyezés egy része elkerülhető lenne, ha csak oda világítanánk, ahol az szükséges. A velemi Szent Vid kápolna közvetlenül nincs megvilágítva, de a fényképen jól látszik, hogy mégis csak elegendő derítést kap a fala. A fény egy része a faluból érkezik, de a fal egy jó része sötétben lenne, ha nem érkezne egy jó adag foton a légvonalban 15–20 km-re lévő Szombathelyről. Ha ránagyítunk a fény forrására, akkor látjuk, hogy egy tucatnyi egyedi, eredendően térvilágítást szolgáló fényforrás adja a kápolnára eső fény döntő részét. Nem valószínű, hogy a lámpák üzemeltetőinek érdeke lenne a kápolna megvilágítása. Ez a példa azt is mutatja, hogy milyen távolságba jut el könnyedén a fény, és a Kőszegi-hegység egyébként háborítatlan faunáját is megzavarhatja ez a szintű megvilágítás. Ez a hatás is elkerülhető lenne – a mai technológiai lehetőségek lehetővé tennék a lámpatestek megfelelő ernyőzését. A hegyről nem szabadna látni a fényforrásokat, csak a megvilágított felületet...

Arra kérjük az olvasót is, hogy járjon nyitott szemmel, és hívja fel a rossz világítási megoldásokra a környezetükben élők és az illetékesek figyelmét is. Rajtunk is múlik, hogy unokáink látják-e majd a Tejutat, és a rovarok eljutnak-e legelőhelyükre, hogy megporozzák számunkra is a növényeket. ☀

Irodalom

Ecological Consequences of Artificial Night Lighting – második kiadás. Szerkesztette: Catherine Rich és Travis Longcore, Island Press, 2006.
Kolláth Zoltán, Dömény Anita: A kozmikus fény végzete, Fizikai Szemle 2015/4, 110–114. old.
Kolláth Zoltán: A fényszennyezésről a Fény Nemzetközi Évében, Meteor Csillagászati Évkönyv, 2015, Magyar Csillagászati Egyesület.

FARKAS GYÖZÖ

Hogyan készül és mire jó az ultrarövid fényimpulzus?

Az utóbbi évek folyamán a híradásokban szenzációként találkozzunk az úgynevezett ultrarövid fényimpulzusokkal kapcsolatos különös jelenségekkel. Öröndöset aktualitást jelent mindezekhez az a tény, hogy hazánkban már nagy erővel épül Szegeden a nagy nemzetközi *Extreme Light Infrastructure* (ELI) nevű lézerközpont, ahol az egyik fő kutatási program éppen az extrém rövid, *attoszekundum* = 10^{-18} sec időtartamú, az atom belső lefolyó mozgások időskálájának megfelelő fényimpulzusok keltése és a velük végzendő *attofizika*. Az attofizika elindulásában és óriási fejlődésében a magyar kutatók itthon és külföldön kulcsszerepet játszanak [2,10,6,7,9, 8,13]. Cikkünkben csak kiragadott példákon felvillantva, vázlatosan foglalhatjuk össze a rövid fényimpulzusok mibenlétével, az évek során egyre rövidebb időtartamú (egyben egyre növekvő intenzitású) formában történő előállításukkal, valamint néhány forradalmian új alkalmazásukkal kapcsolatos főbb ismereteket.

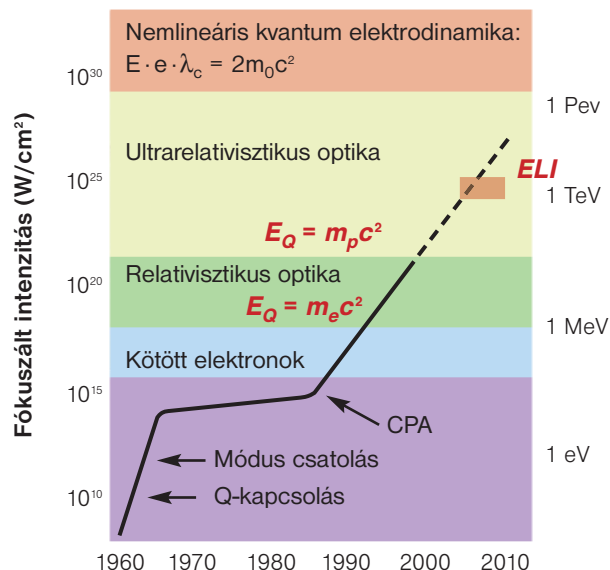
Mi is a rövid fényimpulzus? Valójában egy fényvillanás, rövid τ időtartam alatt kisugárzott fényenergia, melynek fizikai jellemzője a τ alatt 1 cm^2 -en áthaladó ϵ fényenergia adag, vagyis az intenzitás értéke $I = \epsilon/\tau$. Látható, hogy ezen intenzitás vagy az ϵ növelésével, vagy a τ csökkentésével érhető el. Kis intenzitású fényimpulzusokkal megvilágítva valamely rendszert, passzív információkat nyerünk a rendszer állapotáról és mozgásáról, míg a nagy intenzitásúakkal aktív módon beavatkozhatunk annak dinamikájába.

A lézerek előtti időkben folytonosan világító lámpák sugarából optikai zárral vágtak ki fényimpulzusokat. Ezeknél lehetett ugyan a τ időtartamot csökkenteni, de így az ϵ energia is arányosan csökkenve, az I intenzitás értéke maradt ugyanaz. Lassan mozgó jelenségek fényképezéséhez az így előállított *milliszekundumos* (10^{-3} sec = msec) impulzusok megfelelőek voltak. De már akkor felmerült a klasszikus mozgások időbeli követésének igénye: pl. egy ame-rikai lóversenypálya tulajdonosa szeretne volna tudni, hogy a versenyló mozgása során melyik az a pillanat, amikor a ló egyik lába sem éri a földet. Ezt térben 12, egymás után elhelyezett fényképezőgép elektromosan vezérelt, msec lépésekkel késleltetett expozícióival a mozgás fázisainak sorozatát meghatározták, a kérdéses pillanatot megtalálták. A fejlődés a mozgófilmmhez vezetett, de az időbeli felbontás csak msec nagyságrendű maradt.

Az idők folyamán a tudomány fejlődése a lovak mozgásától eljutott az atomi rendszerekben lejátszódó extrém gyors dinamika megfigyelésének igényéhez, ennek kidolgozása a lézerek megjelenése után valósult meg. Az **1. ábrán** mutatjuk be a lézerkutatás [1] alakulását és az ELI-programnak a nemzetközi lézerkutatásokban elfoglalt fontos helyét.

A lézerimpulzusok megvalósításának fejlődése

Az impulzusokat szolgáltató első rubinlézer 1960-as megjelenése megindította a rövid és intenzív lézerimpulzusok megvalósítására irányuló kutatásokat. Az **1. ábrán** az évek függvényében a főbb lézerműködési elvek alapján elért fényimpulzus-energiák és a fő-



1. ábra. A lézerkutatás alakulása és az ELI-programnak a nemzetközi lézerkutatásokban elfoglalt fontos helye

kuszált lézerintenzitások alakulása (bal oldali függőleges tengely) látható, amint az atomhív-fizikától a relativisztikus jelenségeken át a fizikai vákuum kutatásáig ívelő tudományterületeket fogja át. (Az **1. ábra** jelöléseinek magyarázatához emlékeztetünk gimnáziumi tanulmányainkból arra, hogy egy E_L amplitúdójú, $E_L \cos \omega_L t$ szerint rezgő elektromos lézertér az m tömegű „ e ” töltésű elektront az $F = -eE_L \cos(\omega_L t)$ Newton-egyenlet szerint mozgatja. Könnyen kiszámíthatjuk, hogy a rezgő elektron impulzusa $p = eE_L/\omega_L$, *időátlagolt* mozgási, rezgési energiája $E_R = e^2 E_L^2 / 4m\omega_L^2$, amit az irodalomban rezgési (Quiver) energiának (E_Q), vagy „ponderomotoros energiának” is neveznek, mivel egy rövid fényimpulzus a sok rezgetés után az elektronnak ezt a mozgási energiát adja. Az **1. ábrán** E_Q elektronvolt (eV) egységekben van megadva a jobb függőleges tengelyen).

Tudjuk, hogy az impulzus-lézer két (egyik kissé átereszto) tükrök közé helyezett anyag (pl. rubin, neodímium, titán–zafir stb.), melynek atomjait alapállapotukból egy gerjesztett energiájú felső állapotba emeljük valamilyen külső (pl. villanólámpa) gerjesztéssel. E gerjesztett atomok energiájukat vagy „maguktól” kisugározzák „spontán” emisszióval az említett két állapot energia-különbségének megfelelő értékű $\hbar\omega_L$ fotonok formájában ($\hbar$ a Planck-állandó), vagy e fotonok a gerjesztett atomok többi részét energiájuk leadására ösztökélik, „kényszerített” emisszióval. Így ugyanazon fázissal ugyanazon irányban (szerencsés esetben a tükrökre merőlegesen) már több foton halad együtt szabályosan ide-oda a két tükrök között. E *szabad generációs* lézer üzemmód eredménye egy $\tau \sim 10^{-3}$ sec, *milliszekundum* időtartamú, $I \sim 10 \text{ kW/cm}^2$ inten-

zítású, szabálytalan alakú impulzus, mely a részben áteresztő tükrön kilép. E szabálytalan lézerimpulzussal még nem lehet egzakt és új atomi vizsgálatokat végezni.

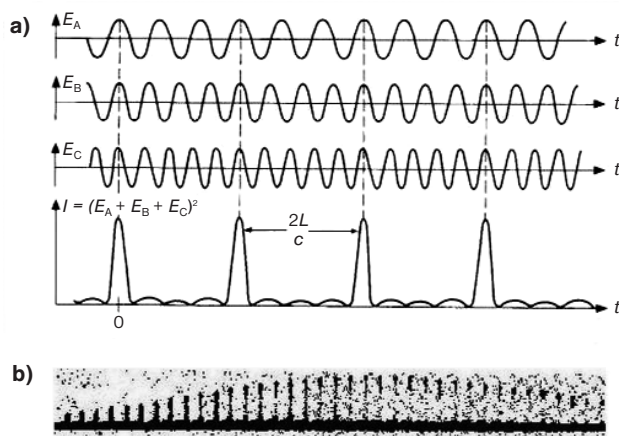
Ezért szabályozni kellett a lézerműködést. Az egyik tükröt a külső pumpálás alatt belülről letakarva a fénynyaláb nem erősödhet a tükrök közötti ide-oda haladással, az atomok döntő része gerjesztett állapotban marad. Ekkor, megfelelő gyorsasággal eltávolítva a takarót, megindul az indukált emisszió és így a lézerműködés is. Ezt az eljárást – a két tükrő alkototta rendszert a mikro-hullámú technikában alkalmazott mintára „Q jósági tényezőjű” üregrezonátornak tekintve – a letakarással a „lézer-üreg” Q jóságának kapcsolása következtében *Q-kapcsolt üzemmódnak* nevezik. Az eredmény egyetlen szabályos haranggörbe-lefutású, néhány száz $\tau \sim 10^{-9}$ sec, *nanoszekundum* időtartamú, $I \sim 10^6$ W/cm² intenzitású, ún. óriási-impulzus, vagy *Q-switched pulse*. Az 1. ábra bal függőleges tengelyén az ezen I intenzitás optimálisra fókuszált értékei vannak.

Természetesen a lézeraktív anyagtól függően a világon számtalan különböző elvű lézer született. Így pl. a szegedi JATE korábbi nagy korszámban meghatározta a világ festék- és excimer-lézer kutatásait. Itt említjük meg a lézertörténet egyik színfoltját, a KFKI munkatársra által épített síkban sugárzó (festék) Glória-lézert [15]).

A fenti nagy intenzitásoknál már jelentkeznek az ún. *nemlineáris optika* jelenségei. Az atomi Coulomb-erőket már megközelítő nagy E_L laser-térerősség az anyagok atomi dipólusait már nem E_L -l leírhatóan rángatják: az elektrodinamika klasszikus $P(E_L) = \chi E_L$ polarizációs kifejezése $P(E_L) = \chi E_L + \chi_2 E_L^2 + \dots$ alakú lesz, tehát E_L -ben nemlineáris tagokkal módosul. Ezért az anyagok n_0 törésmutatója is új formát ölt: $n = n_0 + n_2 E_L^2 + \dots$. Így, mivel a második tag az $I \sim E_L^2$ intenzitástól függ, a lézerfény aktívan új jelenségeket kelt, pl. a piros (ω_L) lézerfény *zöld színű* ($2\omega_L$) második harmonikust kelt. Alkalmas kristályon áthaladva a piros fényimpulzus ott zöld csíkot jelenít meg, de ha ugyanitt szemből egy azonos másikkal találkozunk (autókorreláció), akkor a csíkra a találkozás helyén a piros impulzus alakjának megfelelő zöld domb ül: *így méri a mérsékelt rövid fényimpulzusok időtartamát*.

A fejlődés során figyelembe vettük, hogy a két párhuzamos lézertükrő között futkározó fénycsugár (a megpendített húr ismert esetéhez hasonlóan) *állóhullámokat* alakítanak ki. Így a sugárzó lézerező fluoreszcencia-spektrumának fényéből csak azok az állóhullám-formák, „módusok” alakulhatnak ki, melyek esetén mindig csak fél hullámhossznyi szakaszok K egészszámú többszörösei „férnek be” a tükrök közötti L távolságba: $L = K(\lambda/2)$. (A szomszédos módusok frekvenciakülönbsége $\Omega = 2\pi c/(2L)$). (Ha egyetlen ilyen módus amplitúdója E (így intenzitása $I \propto E^2$), akkor N darab, egymástól független statisztikus fázissal rezgő módus össz-intenzitása $I \propto NE^2$ (ilyenek a fentebb leírt lézerek). Ha azonban az összes N darab fázisát szinkronizáljuk, *fázisban összecsatoljuk* („mode-locking”), az intenzitás természetesen az előző üzemmód N -szeresére nő: $I \propto N(NE^2) = (NE)^2$.

A módusok csatolását a rezonátorba helyezett optikai zárral végezzük, amit minden oda-vissza futási idő „befejezésekor” igen rövid időtartamra kinyitogatunk. E zár lehet elektronikusan vezérelt optikai cella, de lehet a rezonátorba helyezett olyan nemlineáris optikai szűrő, mely nagyobb intenzitás-ugrásoknál transzparensé válik: itt a lézer maga nyitogat. E rövid nyitott időtartam alatt az azonos „jó” fázisban átjutott módusok összecsatolódnak és erősödnek, a többiek nem. Szemléltetésül a 2. ábrán $N = 3$ darab egyenlő E amplitúdójú szinuszos, E_A, E_B, E_C -vel jelölt módus csatolásából adódó, $I \propto (E_A(t) + E_B(t) + E_C(t))^2 = (3E)^2 = 9E^2$ eredő intenzitás időbeli lefutását látjuk (mint 3 közelre hangolt hangvilla, „lebegő” hangja). Mivel a használt (rubin, neodímium, titán-zafir) lézerező nagy optikai sávzélessége következtében az N igen nagy ($N \sim 10^3$) lehet, az intenzitás igen megnő, $I \sim 10^6$ E². E leírt folyamat, mint tudjuk, matematikailag nem más, mint a lézerező $\Delta\omega_L$ sávzélességében kötött fázisban sugárzó megengedett ω_m mó-



2. ábra. a) A lézermódusok csatolásának (mode-locking) elve. b) Egy kísérletileg mért impulzussorozat képe

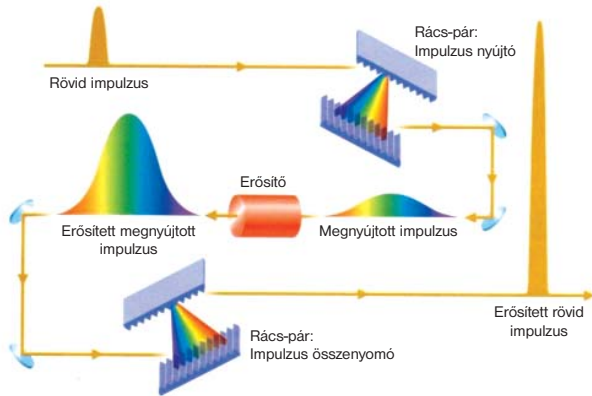
dusainak Fourier-összeadása. E Fourier-szintézis az $E(t) \propto E_L \sin(N\Omega t)/\sin(\Omega t)$ időbeli alakú impulzusok sorozatát adja, melyek tagjaira a $\Delta(N\Omega)\Delta t = \Delta\omega_L \tau \sim 1$ ismert „klasszikus-optikai Heisenberg-reláció” adódik. Látjuk, hogy igen rövid τ időtartamú impulzust nagy $\Delta\omega_L$ sávzélességű forrásból nyerünk: $\tau \sim 1/\Delta\omega_L$. Az itt kapott impulzus-időtartam $\tau \sim 10^{-12}$ sec (*pikosekundum*) – 10^{-15} sec (*femtosekundum*) értékű.

Ezt az impulzust nevezték el történelmileg először *ultrarövid fényimpulzusnak*. Lehet-e ezt tovább rövidíteni vagy nyújtani? [2] Keletkezése után az impulzus különböző $n(\omega)$ törésmutatójú dielektrikumokon halad át. Így a $\Delta\omega_L$ -ben lévő hullámkomponensek kicsit különböző csoportsebességgel haladnak: a hosszabb hullámhosszú („piros”) komponensek sietnek, a rövidek („kék”) késnek. E jelenséget nevezik „csörp”-nek (chirp = csipogás; a radar-technikában ez hallható volt). Így a levegőbe kilépve hiába marad $\Delta\omega_L$ ugyanaz, a detektált impulzus hosszabb lesz. Az így szabályosan torzult impulzusformát vissza lehet rövidíteni eredeti értékére (az első megoldások Szegeden születtek) egy optikai rács (vagy prizmapár) alkalmas beállításával, melyen az áthaladó „piros” komponensek késnek a „kékek”-hez képest. A rácsok komplementer értelmű beállításával viszont vissza lehet „nyújtani” az impulzust [1]. Elegánsabban ugyanez megoldható a magyar kutatók [3] által feltalált ún. „csörpölt” tükrökkel, melynek változó távolságú és vastagságú rétegrendszere van. Ennek külső rétegeiről a „kék” komponensek rögtön vissza, verődnek, míg a „pirosak” beljebb hatolva csak később verődnek vissza, így késnek. Így az eredeti rövid impulzus áll vissza.

Az ultrarövid impulzuscsoomag „egésze”, időbeli burkolója közegekben (lézerelemek, levegő) az $n(\omega)$ törésmutatójának megfelelő *csoportsebességgel* terjed, míg benne az $E_L(t)$ tér szinuszos maximumai *fázissebességgel* haladnak. Így a kilépés után a burkoló alatt a burkolóhoz viszonyítva az $E_L(t)\sin\omega_L t$ maximumai időben különbözőképpen helyezkednek el a lézerből kilépő, fent leírt sorozat tagjaiban. E tény rendkívül fontos, mivel az atomokkal, elektronokkal történő kvantumfizikai kölcsönhatások során kis intenzitásoknál az $I(t)$ intenzitás ($\sim$ burkoló) értéke, nagy intenzitásoknál maga a pillanatnyi $E_L(t)$ térerősség-amplitúdó értéke a meghatározó. Így a burkoló-maximum és az $E_L(t)$ maximumának egybeesése és impulzussorozat folyamán történő egyben tartása komoly és fontos feladat [2]. Speciális lézerekkel az impulzusok rövidítését a sinus $\omega_L t$ oszcillációk számánál folyamatos csökkentésével is megvalósíthatjuk, így ma már eljutottunk ahhoz a stádiumhoz, amikor az impulzus csupán $\sim 1-2$ optikai rezgést, ciklust tartalmaz. (Magyar kutatók ezt még tizedmilliméteres hullámhosszon is megvalósították [4]).

A lézerintenzitás további növelését a lézerben levő anyagok

lézerintenzitás-okozta roncsolása akadályozta. Pedig az 1. ábrán összefoglalt egyre újabb alapfizikai kölcsönhatások területeinek eléréséhez az impulzusok intenzitásának folytonos növelése szükséges. Igen nagy ugrást jelentett az ún. *csörpölt impulzusok erősítése (CPA)* elvű új megoldás [1]. (3. ábra és 1. ábra).

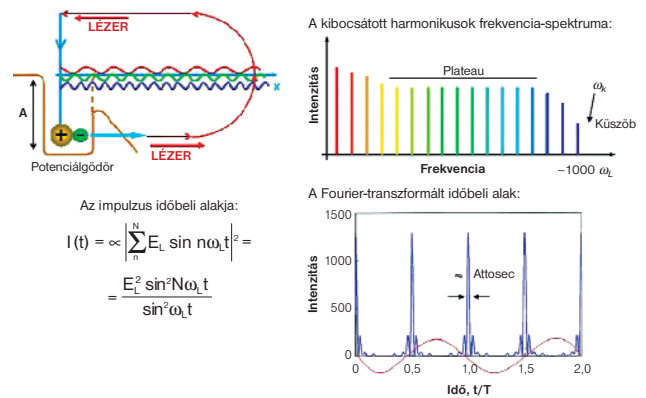


3. ábra. A csörpölt lézermimpulzusok erősítése (CPA)

Ennél az eljárásnál az erősítendő ~ 10 femtosec időtartamú (csörpölt) impulzust az előzőekben említett optikai rács-párral *megnyújtják* közel 10^5 -szeresére, majd a már hosszú, és lencsével nagyobb átmérőre tágított nyalábot egy vastagabb lézer-erősítőn engedik át. Ebben az intenzitás sűrűsége így kisebb lévén, nem okoz roncsolást, ugyanakkor az impulzus energiája igen nagy, 10^{11} -szere értékre nőhet. E nyújtott, most már igen nagy energiájú impulzust ekkor egy másik, ezúttal 10^5 -es faktorral *összenyomó* rács-párra engedve visszkapjuk eredeti rövid ~ 10 femtosec időtartamú impulzust, de már igen nagy ($\sim$ Joule) energiával. Ezt fókuszálva az intenzitás túllépheti az $1\sim 10^{15}$ W/cm² = Petawatt/cm² értéket. Az 1. ábrán látjuk, milyen nagy ugrást hozott a CPA-eljárás. Az ezt megelőző lézerek 10^{14} W/cm² alatti intenzitásainál a nemlineáris optika vizsgálata volt a döntő, ahol a lézertény 1. ábrán jelölt rezgési energiája $E_Q \sim 1$ e Volt rendű volt, ami egy-, vagy többfotonos változásokat, másodharmonikus keltést, sokfotonos fotoeffektust [5]... stb. hozhatott létre az atomok külső elektronjainál. A CPA-val túllépve a 10^{15} W/cm² értéket, új területre, a *relativisztikus optika* területére érkezünk: itt lézer E_L ere meghaladja az atomi $\sim 10^9$ V/cm Coulomb-tereket, az elektron sebessége c -hez közelít, az E_Q rezgési energiák elérik az $E_Q \sim mc^2 \sim$ MeV, majd az $m_p c^2$ proton-tömegnek megfelelő $\sim$ TeV energiákat.

Attoszekundumos fényimpulzusok

Így nyílt meg az út az *attoszekundumos* (10^{-18} sec) *fényimpulzusok* előállításához is. Ennek előfeltétele a lézertény igen *magas harmonikusainak keltése* volt. Az előzőekben említettük, hogy az atom a benne kötött külső elektronnal lineáris harmonikus dipól-oszcillátornak tekinthető, mely növekvő intenzitásoknál anharmonikus-sá válva, az ω_L néhány egészszámu többszörösének frekvenciáját is kisugározza, tehát már a lézertény néhány harmonikusát is. Még tovább növelve az intenzitást (4. ábra), az atomi Coulomb-erőket megközelítő, oszcilláló E_L lézertér a pozitív félperiódusban optikai alagúteffektussal az atomból „kihúzza”, majd nagy energiát ad az elektronnak, a negatív félperiódusban pedig visszacsapja szülő-ionjához, ahol azzal rekombinálódik, és a kapott nagy energiát igen magas rendű harmonikus fotonok, *magas harmonikusok* formájában sugározza ki, a láthatóktól a Röntgen-hullámhosszakig. Így egy igen széles, az ω_L lézertényfrekvencia egész számu többszöröseinek egyenközü sorozatát tartalmazó vonalas spektrumot ka-



4. ábra. Az attoszekundumos fényimpulzusok keltésének elve (felső rész), és az $I(t)$ időbeli lefutású egyes impulzusok sorozatának képe (alsó rész)

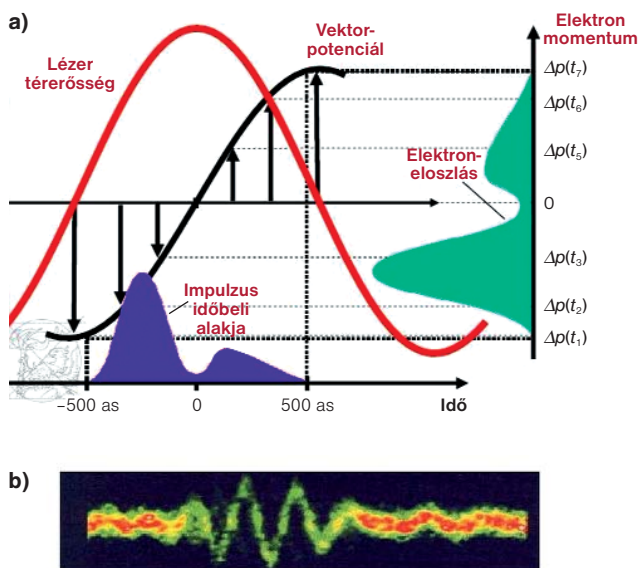
punk. (4. ábra, felül). Látjuk, hogy az elektron így nyert maximális energiája az A kilépési munka és az E_Q rezgési energia összege. Így a spektrum, a számítások szerint, egy plateau után le-
vág az $\omega_K \sim (A+E_Q)/\hbar$ küszöbértéknél. A harmonikusok N száma elérheti az 1000-et, így a $\Delta\omega \sim N\omega_L$ sáv szélesség igen nagy lehet.

A természetben ilyen óriási szélességű spektrum eddig ismeretlen volt. A KFKI kutatói fogalmazták meg először [6], hogy e rendkívül széles vonalas spektrumú sugárzás a $\tau \sim 1/\Delta\omega$ reláció alapján rendkívül rövid fényimpulzusok sorozatának előállítására alkalmas. Most N -nel a harmonikusok rendszámát jelölve, a Fourier-eljárás szerint N darab (természetszerűen fázisban kötött) harmonikus fényét adjuk össze (4. ábra). Így egyszerű összeadás után a lézertény minden félperiódusában megjelenő impulzusok sorozatát vártuk (4. ábra, lent): a sorozat egy tagjának időbeli alakja $E(t) = \sin N\omega_L t / \sin \omega_L t$, sáv szélessége $\Delta\omega \sim N\omega_L$, időtartama $\tau \sim \Delta\omega \sim 1/(N\omega_L)$ attosecundum = 10^{-18} sec, az eddig megvalósított legrövidebb fényimpulzus-hossz. Szemléltetésül: az 1 attosec időtartam az atomi elektron Bohr-pályán végzett egy körbefutásának ~ 140 -ed része; a pulzus térbeli hossza $\sim c \cdot \tau = 0,3$ nanométer; – míg az Univerzum kora $\sim 10^{18}$ sec.

Az *attofizika* új korszakot nyitott meg: az atomi belső mozgások vizsgálatának megvalósítását az atomi idők attosec-os skáláján [7,8,9].

A következő nagy lépés ezen attosec-os impulzusok detektálásának és alkalmazásának megvalósítása volt. (Az alábbiakban a rövidség kedvéért a lézertény „LP”, az attoszekundumos pulzust „AP” rövidítéssel fogjuk jelölni). Az AP detektálása és jellemzőinek meghatározása már nem lehetséges a régebbi makroszkopikus nemlineáris optika fentebb tárgyalt módszereivel. Az új, atomi szintű eljárások közös alapja az AP-vel keltett fotoelektronok LP-vel történő időkorrelációja. A legismertebb módszer [10] lényege nagyon vázlatosan a következő (5. ábra (a)). Az LP-vel AP-t, majd ezen AP-vel fotoelektronokat keltünk, mely utóbbiak eloszlásának időbeli alakja (5. ábra, lila) természetesen egyezik az AP időbeli alakjával. Majd a fotoelektronokat megvilágítjuk az LP-vel, pillanatanként késleltetve. Az LP lézertérbe került fotoelektronok p_0 impulzusát (mozgási momentumát), mint a bevezetőben láttuk, a lézertér $\Delta p = eE_L(t)/\omega_L$ értékkel megváltoztatja. Így a $p_0 = mv_0$ impulzushoz a lézertér további $\Delta p = eE_L(t)/\omega_L$ impulzusértéket ad, vagyis a pillanatnyi érték: $p(t) = p_0 - eE_L(t)/\omega_L$ (vagy a téri $A_L(t)$ vektorpotenciáljával: $p(t) = p_0 - e/c A_L(t)$). Így az AP fényimpulzus időbeli alakja (lila) „kinagyítva” jelenik meg az elektronsebesség (elektronenergia) eloszlás alakjában (5. ábra, zöld, jobb oldali függőleges tengely).

A sorozat kísérleti kimutatását 2001-ben elvégezték [11], azonban komoly vizsgálatokhoz a 4. ábrán látható sorozat egyetlen „el-



5. ábra. a) Az attoszekundumos impulzus detektálásának elve, és b) egy tipikus attoszekundumos impulzus mért alakja

különített” tagjának használata szükséges, bonyolult eljárásokkal később ez az elkülönítés megvalósult. Ehelyett viszont, szintén 2001-ben, külföldön magyar kutatók vezetésével elsőként *eleve egyetlen* különálló attosec-os impulzust keltettek: ők kvázi egyetlen ciklusú igen rövid lézermimpulzust használva állították elő a harmonikusokat. Így azok spektruma (részben) *folytonosra* módosult, ami a Fourier-elméletnek megfelelően *egyetlen* különálló attosec-os impulzust szolgáltatott [10]. Az AP-ok az őket alkotó igen magas harmonikusok rövid hullámhosszai következtében kis területre fókuszálhatók, így fókuszált intenzitásuk elérheti a nagy lézerrendszerekének $\sim \text{PW}/\text{cm}^2 = 10^{15} \text{W}/\text{cm}^2$ értékét. Ma már egyetlen oszcillációs ciklus tartalmazó, ~ 10 asec időtartamú impulzusokat állítanak elő (5. ábra (b)).

Már nemcsak gázatomokból, hanem szilárdtestek felületéről (belsejéből) is kellenek AP-kat: a beeső erős lézertény ionizációval elektron-plazma réteget, „plazmatükröt” kelt, mely az elektronok anharmonikus mozgásával rezeg. Így arról a lézertény reflektált irányába magas harmonikusok emittálódnak. De, nagyon kvalitatív formában említve, harmonikus spektrum kelthető akkor is, ha $\sim$ nanométer-vékony fóliából erős lézermimpulussal „elektronréteget” keltünk, ami relativisztikus sebességgel tovább halad. Ezt szembehaladó irányból egy hasonló lézermimpulussal meglöve az igen nagymérvű Doppler-eltolódás következtében Thomson–Compton-szórással keletkezik a harmonikus spektrum. Mindezen eljárások azután AP-keltést tesznek lehetővé.

Rövid fényimpulzusok az alapkutatásokban: néhány jellegzetes példa

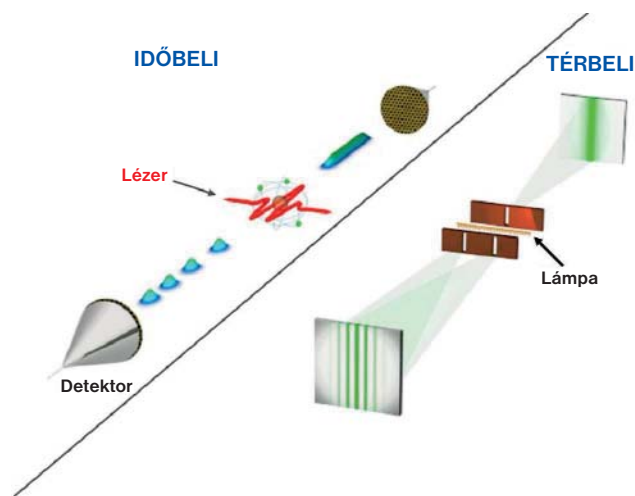
Az eddig ismertetett különféle rövid fényimpulzusokkal a fizika óriási területe vizsgálható (1. ábra). E rendkívül nagyszámú vizsgálatból itt csupán néhány jellemző példát villanthatunk fel, melyek referenciáira helyszűke miatt a kiváló összefoglalókon át [1, 10] utalunk. (A kémiai, szilárdtestfizikai, biofizikai, orvosi stb. témák is ezekben találhatók).

Fotoeffektus. Láttuk a fotoemisszió fontos szerepét atomoknál (4. ábra), de ez igaz fémek esetén is. Üvegprizma átfogó lapjára párolt nanométer vastagságú fémréteget az üvegtoldal felől megvilágítva elektronsűrűség (felületi plazmon)-hullámok keletkeznek, melyek tere a fém fölé kissé „kilógva” halad, itt $10^{15} \text{W}/\text{cm}^2$ ér-

tékre erősödhet. Így a nagy lézerrendszerek egyes paraméterei „miniatur” formában elérhetők, tehát kisebb lézerekkel is (pl. KFKI) vizsgálhatók a sokfotonos fotoeffektus, a tunnelemisszió, a fotoelektron gyorsítás stb. új alapjelenségei [12,13].

Atomhéj fizika. Jellegzetes eljárás itt az ún. „pumpa-próba” módszer, amikor az atomi rendszerben egyik fényimpulussal gyors gerjesztést keltünk (pumpa), majd e változást egy folyamatos időbeli lépésekkel utána küldött második fényimpulussal „letapogatjuk” (próba) a gerjesztett rendszer időbeli visszaállását. Az első, mérőldkönek számító attosec-os héjfizikai eredmény az Auger-folyamatban lezajló, az atomi belső héjak visszarendeződésének első valós idejű meghatározása volt: az AP a gerjesztette héjrendszert, a második, az őt keltő LP, késleltetésekkel letapogatta azt. A kilépő Auger-elektron energiaspektrumának változásából meghatározták a bomlási időt [10].

Egy másik tipikus példában egy első impulzus nemesgázatom egyik elektronját gerjesztett állapotba, elliptikus pályára emelte. A második, letapogató AP különböző időpontokban ionizálta az atomot: amikor az elektron az ellipszis aféliumánál volt, nagy, amikor a perihéliumánál volt, kis valószínűségű volt az ionizáció. (Tudjuk: a keringési idő ~ 140 asec !).



6. ábra. A Young-kísérlet időbeli attoszekundumos „résekkel” (bal oldal). Klasszikus térbeli Young-elrendezés térbeli résekkel (jobb oldal)

Végül egy elegáns, igazi attosec-os kísérlet: Young-féle kettős rés *időben* (6. ábra) [10]. A jobb oldalon a klasszikus *térbeli* elrendezés: a lámpa egy egyréses és egy kétréses lemez között van. A jobb oldali fenti ernyőn az egyetlen résből nem keletkezik interferencia, míg a lentin a két résből igen, láthatók a csíkok. A bal oldalon hasonló, de *időbeli* „réseket” látunk: az atomi elektron-felhőbe belépő közel egyciklusos attosec-os fényimpulzus egyetlen, pozitív oszcillációs ciklusa felfelé egyetlen „rés” jelent az E_L által optikai tunnelemisszióval kihúzott elektronnak: a fenti detektor sima eloszlást jelez. Lefelé a 2 negatív ciklus 2 „rés” jelent a tunnelező elektron számára. Itt a detektoron az elektronok energieloszlásában periodikusságot, csíkokat detektálnak: az elektron két „része” interferál.

Csak jelezzük, hogy leegyszerűsítve hasonló típusú eljárással atom-, vagy molekulatomográfia is megvalósítható: a fotoeffektussal (vagy optikai tunnelemisszióval) kiléptetett elektron (hullámfüggvényének) már „kilépett” része a még „bent maradtal” interferálva képet ad az atom, molekula elektroneloszlásának dinamikájáról [10].

Lézeres elektrongyorsítás. Egyensúlyi plazmába löve egy lézermimpulzust, az előrelőki az egyensúlyi elektronokat az ionoktól, így

ezek között igen erős longitudinális, ún. *ébredő tér* lép fel. Ha e tér is és a lézerimpulzus is ugyanaz, c-nél kisebb sebességgel haladt, benne egy elektron $\sim 4\text{GeV}$ energiát nyert asztali méretű lézergyorsítóban 3 cm hosszon [14] Livermore-ban, magyar kollégánk részvételével. Az eredmény a $\sim 10\text{ km}$ kerületű körgyorsítókkal szemben ígéretes előny.

Inerciális fúzió. Nagyenergiájú lézerimpulzusokkal sugárírányokból „lassan” összenyomott deutérium-trícium gömbtarget felületére alkalmas pillanatban irányított ultrarövid impulzussal MeV-es elektronnyalábot keltenek, mely a gömb közepéig hatolva remélhetően begyűjtja majd a fúziót (fast ignition) [1].

Fizikai vákuum. Extrém nagy lézerintenzitások a dielektrikumokhoz hasonlóan a *fizikai vákuumot* (benn az elektron-pozitron párokat) is nemlineárisan polarizálják. A *nemlineáris kvantum-elektrodinamika* szerint ha a lézer E_L elektromos térerőssége túllépi az ún. $E_S = 2mc^2/(e\lambda_c) = 10^{16}\text{V/cm}$ Schwinger-teret (itt λ_c az elektron Compton-hullámhossza), új jelenségek várhatók: párkeltés, foton–foton szórás, stb. Az E_S érték túllépéséhez $I \sim 10^{30}\text{W/cm}^2$ lézerintenzitás szükséges, melynek elérése a jelenlegi 10^{23}W/cm^2 érték alapján biztató [1].

E vázlatos összefoglalásban csupán néhány kiragadott jellegzetes témát villanthatunk fel a rövid fényimpulzusok fizikájának óriási területéről. E témák az ELI programjának alapját képezik, így a jövőben remélhetően nagyon sokat hallunk további fejlődésükről. ✨

Irodalom

- [1] G. Mourou: The ultrahigh-peak-power laser: the present and future, *Applied Physics B* **65** (1997) 205.
- [2] T. Brabec, F. Krausz: Intense few cycle laser fields, *Review of Modern Physics* **725** (2000) 545.
- [3] R. Szipőcs, K. Ferencz, Ch. Spielmann, F. Krausz: Chirped multilayer coatings for broad-band dispersion control in femtosecond lasers, *Optics Letters* **19** (1994) 201.
- [4] L. Pálfalvi, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling: Novel setups for extremely high power single-cycle terahertz pulse generation by optical rectification *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008).
- [5] Farkas Gy.: Fotoeffektus igen nagy fényintenzitásoknál, *Fizikai Szemle* **26** (1976) 429.
- [6] Gy. Farkas, Cs. Tóth: Proposal for attosecond light pulse generation using multiple harmonic generation processes in rare gases, *Physics Letters A* **168** (1992) 447.
- [7] Krausz F.: Elektronok mozgásban, *Fizikai Szemle* **52** (2002) 12.
- [8] Varjú K.: Attoszekundumos impulzusok, *Fizikai Szemle* **58** (2008) 87.
- [9] Farkas Gy.: Attoszekundum időtartamú fényimpulzusok, *Fizikai Szemle* **56** (2006) 408.
- [10] F. Krausz, M. Ivanov, Attosecond Physics, *Review of Modern Physics* **81** (2009) 163.
- [11] P. Agostini, L.F. DiMauro: The physics of attosecond light pulses, *Reports of Progress in Physics* **67** (2004) 813.
- [12] Dombi P, Irvine SE, Racz P, Lenner M, Kroo N, Farkas G, Mitrofanov A, Baltuska A, Fuji T, Krausz F, Elezabai AY: Observation of few-cycle, strong-field phenomena in surface plasmon fields. *Opt. Expr.* **18**, (2010)24206.
- [13] Balogh E, Kovács K, Dombi P, Fülöp JA, Farkas G, Hebling J, Tosa V and Varjú K: Single attosecond pulse from terahertz-assisted high-order harmonic generation; *Phys. Rev. A*; **84**, 023806, (2011).
- [14] S. M. Hooker: Developments of laser-plasma accelerators *Nature Physics* **7** (2013) 775.
- [15] Z. Gy. Horvath, A. V. Kilpio, Picosecond two-dimensional „HALO” superradiance and laser in Rhodamin6G, *Optics Comm.* **35** (1980)142.

Különszámunk szerzői

DR. ABONYI IVÁN, a fizikai tudományok kandidátusa, Budapest;

DR. ANDRÁSFALVY BERTALAN, PhD, kutatóorvos, MTA, Kísérletes Orvostudományi Kutatóintézet, Budapest;

BACSÁRDI LÁSZLÓ középiskolai tanuló, Széchenyi István Gimnázium, Sopron;

DR. BOTH ELŐD csillagász, Budapest;

CSÁJI ATTILA festőművész, grafikus, fényművész, holográfus, Budapest;

DR. FARKAS GYŐZŐ, az MTA doktora, professor emeritus, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest;

DR. FODOR LAJOS, PhD, egyetemi adjunktus, Pannon Egyetem Műnői Kar, Kémia Intézet Általános és Szervetlen Kémia Tanszék, Veszprém;

FRIEDL ZITA középiskolai tanuló, Széchenyi István Gimnázium, Sopron;

DR. HORVÁTH GÁBOR biofizikus, az MTA doktora, habilitált egyetemi docens, Eötvös Loránd Tudományegyetem Környezetoptika Laboratórium, Biológiai Fizika Tanszék, Budapest;

DR. HORVÁTH OTTÓ intézetigazgató egyetemi tanár, Pannon Egyetem Műnői Kar, Kémia Intézet Általános és Szervetlen Kémia Tanszék, Veszprém;

DR. KAJTÁR MÁRTON (1929–1991), szerveskémikus, egyetemi tanár;

DR. KISS L. LÁSZLÓ akadémikus, csillagász, az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet tudományos igazgatóhelyettese, Budapest;

DR. KOLLÁTH ZOLTÁN egyetemi tanár, Nyugat-magyarországi Egyetem, Természettudományi és Műszaki Kar, Matematika és Fizikai Intézet, Szombathely;

DR. KOZMA-BOGNÁR LÁSZLÓ molekuláris biológus, tudományos főmunkatárs, MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont, Növénybiológiai Intézet, Szeged;

LANG ÁGOTA matematika–fizika szakos középiskolai tanár, Széchenyi István Gimnázium, Sopron;

DR. LENTE GÁBOR egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Kémiai Intézet, Debrecen;

DR. PATKÓS ANDRÁS akadémikus, fizikus, az ELTE emeritus professzora, Budapest;

DR. PÉCZ BÉLA, a fizikai tudományok doktora, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet igazgatóhelyettese, Budapest;

DR. RADNAI GYULA fizikus, ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék, Budapest;

DR. SCHILLER RÓBERT, a kémiai tudományok doktora, professor emeritus, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest;

DR. SOLT GYÖRGY elméleti fizikus, Zug, Svájc;

STAAR GYULA főszerkesztő, Természet Világa, Budapest;

DR. SZABÓNÉ BÁRDOS ERZSÉBET, PhD, egyetemi docens, Pannon Egyetem Műnői Kar, Kémia Intézet Általános és Szervetlen Kémia Tanszék, Veszprém;

DR. SZABAD JÁNOS egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar, Orvosi Biológiai Intézet, Szeged;

DR. TOMASZ JENŐ, a kémiai tudományok doktora, Gödöllő.

Fényreszabott méter

Beszélgetés Bay Zoltánnal

Harmincöt év telt el ennek az interjúnak a megszületése óta, melyet a Természet Világa 1980. évi 7. számában közöltünk először. A hetvenes évek végén az Amerikai Egyesült Államokból hazalátogató Bay Zoltán az általa kezdeményezett, a fény sebességére alapozott új méterdefiniőről beszélt. Küzdelméről, hogy a javaslatát elfogadtassa. Úgy gondolom, a Fény Éve különszámunkban ma is tanulságos lehet akkori gondolatait újra elolvasni.

Ma már tudjuk, hogy a nemzetközi Általános Súly- és Mértékügyi Konferencia (CGPM) alig három évvel e beszélgetés megjelenése után, 1983-ban Bay Zoltán javaslatát fogadta el. A konferencia döntése alapján tehát 1 méter az a távolság, melyet fény vákuumban $1/c$ másodperc alatt megtesz, ahol $c = 299\,792\,458$, ami a fénysebesség SI egységében mért, 1983-ban elfogadott számértéke. Ez ma már rögzített szám (nem változik, noha a fény sebességét idővel pontosabban ismerhetjük).

Bay Zoltán diákkorától a Természettudományi Közlöny olvasója volt, első cikke 1941-ben jelent meg a folyóiratunkban. Később, a nyolcvanas évek végétől haláláig több írása (interjúja) látott napvilágot a Természet Világában. Életének fontosabb állomásait a Fizikusok az aranykorból (Vince Kiadó, 2006) interjúkötetéből átvett szövegrésszel idézem fel:

„Bay Zoltán Gyulaváriban született 1900. július 24-én. A Debreceni Református Kollégiumban érettségizett, majd a budapesti tudományegyetemen mint Eötvös-kollégista szerzett matematika-fizika szakos tanári oklevelet 1923-ban, három év múlva bölcsészdoktorátust.

Berlinben a Physikalische-Technische Reichsanstaltban, majd az egyetem Fizikai-Kémiai Intézetében dolgozott (1926–1930). 1930-tól öt évig a szegedi egyetem Elméleti Fizika Tanszékének a tanára. 1936-tól 1948-ig vezette az újpesti Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. Kutatólaboratóriumát. A budapesti Műegyetem Atomfizika Tanszékének első professzora.



A magyarországi radarkutatások vezetője. 1946-ban csoportjával első között észlelte a Holdra küldött radarjelek visszaverődését. 1983-ra sikerült elfogadtatnia, hogy a fénysebességre és az idő egységére alapozzák az új métermeghatározást.

1948-tól Amerikában élt, a George Washington Egyetem kutatóprofesszora (1948–1955), a Szabványügyi Hivatal csoportvezető fizikusa, és az atomfizikai osztály vezetője (1955–1972) volt. Ezután a washingtoni egyetem kutatóprofesszora lett. A Magyar Tudományos Akadémia 1937-ben választotta levelező tagjának, 1945-ben rendes tagnak. 1946 és 1949 között a Matematikai és Természettudományos Osztályának elnöke volt. Külföldre távozása után akadémiai tagságától megfosztották. 1981-ben Akadémiánk tiszteleti tagjává választották, 1989-ben pedig visszaállították rendes tagságát. Nyolcvan

évesen megkapta a Franklin Társaság Boyden-díját, kilencvenedik születésnapján pedig a Magyar Köztársaság rubinokkal ékesített Zászlórendjét.

Az *élet erősebb* című könyvében maga számol be kalandos és sikeres életútjáról (1990).

Washingtonban hunyt el, 1992. október 4-én. Végakarata szerint szülőföldjén, a gyulavári református temetőben helyezték végső nyugalomra, 1993. április 12-én 12 órakor.”

S. GY.

„A kedves Olvasó engedjen meg nekem itt egy visszaemlékező megjegyzést. 1980-ban, amikor az interjút megjelenésre készítettem elő, Fenyő Bélát, az Élet és Tudomány akkor már nyugdíjas főszerkesztőjét nevezték ki a Természet Világa megbízott főszerkesztőjének. Vele visszatért szerkesztőségünkbe az értékközpontú műhelymunka. Hosszasan töprengtünk egy-egy írás jobbitásán, sokszor napokig kerestük a cikkekhöz a jó címet. Örülhetett az a szerkesztő, akiét, mint a legtalálóbbat, elfogadták a társai. Emlékszem rá, ez az interjú is „A fénysebesség állandóságára alapozott új méterdefinió” munkacímrel indult. Azután, egy reggeli készülődéskor beugrott nekem a „fényreszabott méter”. Siettem a szerkesztőségbe, hogy kipróbáljam ezt a többiekén is. Mindenkinek tetszett. Azután ezzel a címmel megjelent az interjú, s később a hazai médiában is felbukkant és elszaporodott a „fényre szabott” méter. Ennyit a szerkesztői munka kis örömeiről.

– *Professzor úr Magyarországon járva nemrégiben előadásokat tartott Szegeden, Debrecenben és Budapesten arról a javaslatáról, hogy a hosszúság egységét, az új métert, a fény sebességére kell alapozni. Mi indította Önt erre a gondolatra?*

– Ez a gondolat 1965 óta foglalkoztat, azt is mondhatnám, hogy azóta ez a vesszőparipám. A gondolat onnan származott, hogy a Bureau of Standardsben, Amerika legnagyobb méréstudományi intézetében új eljárást dolgoztam ki a fénysebesség pontosabb megméréseire. Az új mérési módszer lézerefényforrásokat alkalmazott, és azoknak nagy rezgésszám-állandósága olyan feladat megoldását is lehetővé tette, mely nem volt benne a programban, s ami

még fontosabbnak bizonyult, mint az eredetileg kitűzött cél. Amellett, hogy fénysebességet tudtunk mérni, a módszer megengedte, hogy fényrezgésszámokat határozzunk meg. Ez valami egészen új a fizika területén. Azelőtt fényrezgésszámokat csak közvetve ismertünk, a fény sebességének közvetítésével. Ha ugyanis megmérjük a fény hullámhosszát, a fény sebességének ismeretében ki tudjuk számítani a rezgésszámot. Persze, az így kiszámított rezgésszám soha nem lehet pontosabb, mint amennyire a fény sebességét ismerjük.

Most azonban a helyzet drámai módon megfordult. Kiderült, hogy a rezgésszámokat nagyobb pontossággal tudjuk mérni, mint

a fény sebességét, ugyanis a rezgésszám mérése időmérés, és ennek pontossági határa az atomórák rendkívül nagy pontossága. Ezzel szemben a fény sebességének megmérése sohasem lehet pontosabb, mint a mindenkori méterdefiníció pontossága, ami pedig jelenleg messze elmarad az atomórák pontossága mögött.

Mi tehát a helyes út? Ahelyett, hogy a méterdefiníciót igyekeznénk a jövőben lépésről lépésre pontosabbá tenni, ugorjunk mindjárt a folyamat végére: válasszuk a fény sebességét alapszámítás gyanánt, és ezzel határozzuk meg a métert. Az a távolság, amelyet a fény 1 másodperc alatt befut, az úgynevezett „fénymásodperc”, adott számú méter legyen. Ezt az adott számot egyszer s mindenkorra egy nemzetközi bizottság (a méterbizottság) állapítsa meg. Ha ez megtörténik, a métert nem kell többé pontosítani, a méter pontossága mindig ugyanakkora lesz, mint a másodpercé, azaz az atomórák pontossága. Utóbbiak tökéletesedésével a méter pontossága is javul.

– *Ez mind igen érdekes. De nem rejtőzik ebben a gondolatmenetben egy feltevés: mégpedig az, hogy a fény sebessége minden körülmények között állandó mennyiség?*

– A kérdés nagyon indokolt. Válaszom erre az, hogy a mai tudásunk szerint a fénynek vákuumban való terjedési sebessége a természet univerzális állandója. Különösen fontos szerepet kapott a fénysebesség állandósága a huszadik század elméleti fizikájában. Tudjuk, hogy a relativitáselmélet a fénysebesség állandóságán alapszik. De akármilyen szép, logikus és önmagában kielégítő az elmélet, a kísérleti fizikus sohasem szűnik meg föltenni a kérdést: mekkora pontossággal egyeznek az elméletből levezetett eredmények a tapasztalattal? Ennek megfelelően a programunk úgy alakult, hogy előbb a Bureau-ban befejeztük a tervbe vett fénysebességmérést. Pontosítottuk az eddig elfogadott értéket, de ami még fontosabb volt, a kísérlet megmutatta, hogy fényrezgésszámokat pontosabban tudunk mérni, mint a mai méter pontossága. Megmértük egy lézer vörös fényének rezgésszámát. Ez 1972-ben történt, s azóta még mindig a mi mérésünk az egyedüli, mely a látható spektrumban mért fényrezgésszámot. E kísérletek után én visszavonultam a Bureau of Standardsból, s azóta két kérdés foglalkoztat.

Az első kérdés: mekkora pontossággal igazolják a régebbi és a legújabb kísérleti eredmények a fénysebesség állandóságát? Az ez irányú vizsgálat kísérleti adatok összegyűjtéséből és kiértékeléséből áll.

A második kérdés: mennyiben lehetséges a relativitáselmélet felépítése függetlenül attól, hogy a fénysebesség állandóságából indulunk ki?

Fontos elmondani, hogy az elmúlt évtizedben több olyan igen jelentős kísérletet végeztek, mely a relativitáselmélet és így a fénysebesség állandóságát támasztja alá. Ugyancsak fontos, hogy elméleti vizsgálataim szerint a relativitás elméletét fel lehet építeni olyan kísérletek alapján, amelyek nem optikai kísérletek. Más szóval, a relativitáselméletet fel lehet építeni a „sötétben”.

Az eddigi kísérleti és elméleti eredmények szerint tehát nem kell aggódnunk, hogy a fény sebessége „cserben hagy” bennünket, ha az új métert reá akarjuk alapítani.

– *Milyen bizalommal állíthatjuk, hogy ez a jövőben is így lesz?*

– A jövőt nem ismerjük. De a múltba ma is vissza tudunk nézni, ha nagy távolságokba tekintünk, és olyan galaxisokat észlelünk, melyekből a fény több milliárd évvel ezelőtt indult el. Nos, ilyen rég kibocsátott spektrumok energianívóinak vizsgálata azt mutatja, hogy a fénysebesség és a finomszerkezeti állandó milliárd évekkel ezelőtt sem különbözött a mai értékektől. Hát, ha ez így volt a régmúltban, miért ne lehetne így a jövőben is?

– *Említette az időegység nagy pontosságát, és hogy a méter mai pontossága sokkal kisebb. Mi okozza a különbséget, és miért van szükség új méterdefinícióra?*

– Hogy erre a kérdésre feleljek, el kell mondanom néhány szóval, hogyan alakult ki a hosszúság és az idő egységeinek definíciója a fizika története folyamán.

A métert francia fizikusok csinálták az 1800-as évek elején. A francia forradalmat megelőző, és azt követő néhány évtizedben a fizika egyik virágkorát érte el francia területen. A XVIII. század végén Lagrange, Laplace vizsgálatait a Newton által egy évszázaddal előbb megalapozott mechanikát nagy tökéletességre emelték, majd a XIX. század elején Arago, Fresnel, Ampère fejlesztették ki a fénytant és az elektromosságtant.

A francia fizikusok szükségét érezték annak, hogy a láb, a hüvelyk és a többi, kétesen definiált egységek sokaságában rendet teremtsenek. Elgondolásuk az volt, hogy az új egységet a Föld méretéhez idomítsák úgy, hogy a Párizson átmenő délkör hossza 40 millió méter legyen. Ezért a fiatal Arago Párizstól Gibraltárig mérőrudak egymás után helyezését mérte meg a távolságot, közben csillagászati megfigyelésekkel meghatározták a földrajzi koordinátákat. (Többször elfogták spanyol területen, mint francia kémeket, de a küzdelmet nem adta fel. Utána húszegynéhány éves korában a francia akadémia legfiatalabb tagja lett.)

Arago méréseinek eredményeképpen a francia fizikusok egy méterrúdat készítettek, melyen két finom karcolás jelezte a méter hosszát. Fontos lépés volt, hogy a francia akadémia a méter többszöröseire és törtszereire a tízes számrendszert vezette be.

Természetesen Arago mérései véges pontosságúak voltak, tehát amikor a mérés technika pontosabb lett, el kellett szakadni a Föld méreteitől. Maradt a párizsi méterrúd, s a két vonás távolsága. Később ez sem volt elég pontos, mert más-más métert kapok, ha mikroszkóp alatt a karcolást jobbról, és mást, ha balról nézem.

Ezért *Babinet* (ismét egy francia fizikus) javaslatára már a XIX. század 30-as éveiben arra törekedtek, hogy a méterrúd helyett egy jól meghatározott spektrumvonal hullámhosszát próbálják meg alapszámítás gyanánt használni. Ez azért szerencsés gondolat, mert az atomok spektrumvonalait a természet hozza létre, tehát azok hullámhossza pontosabb, állandóbb.

E törekvés megvalósításában oroszlanrészre volt egy amerikai fizikusnak, *Michelsonnak*, aki kiértékelte a méterrúd hosszát, és a kadmiumatom egy kék vonalának hullámhosszával fejezte ki a századforduló körül. Ilyen munka aztán tovább folyt, egyre finomabb mérésekkel, míg 1960-ban a nemzetközi mértékbizottság a kriptonomatom 86-os izotópjának egy narancssárga vonalát fogadta el standard gyanánt, megmondva, hogy a méter hány hullámhossz legyen.

Az ilyen definíció értéke abban áll, hogy bármely fizikus a saját laboratóriumában reprodukálhatja a métert, nem kell Párizsba mennie, vagy a saját országának métermásolatát felkeresnie. Persze ennek a reprodukciónak is vannak elvi határai.

– *Mi a helyzet a másodperccel kapcsolatban?*

– Hasonló, de a feladat valamivel könnyebb. Ősidőktől fogva az idő egysége a Föld forgásidejével kapcsolatos, oly módon, hogy a földi nap hossza, vagyis a Napnak két egymás utáni delelése közt eltelt idő hossza 24 óra, azaz 86 400 másodperc legyen. A csillagászok évszázadok óta tudják, hogy ez az időtartam az évszakok szerint változik, mert a Föld nem állandó sebességgel kering a Nap körül, de ez nem okozott nehézséget, mert középértéket lehetett venni, az ún. középnapot. A XX. század első felében

Bay Zoltán és felesége Keszthelyi Lajossal, a Szegedi Biológiai Központ előtt



azonban kiderült, hogy a Föld forgássebessége maga is rendetlenkedik (a sarkok kismértékű változása miatt), továbbá, hogy a Föld forgása is lassul, mert dagály-apály miatt a Föld mozgási energiát veszít. Ezt már nehezebb lett volna korrigálni, tehát kapóra jött, hogy 1950 körül egy újfajta óra létesült, az atomóra.

Minden óra elvileg két részből áll: az egyik része rezgéseket végez, a szerkezet másik része pedig megszámlálja a rezgéseket. Gondoljunk az ingaórára, vagy a karóra billegőjére és a fogaske-rek-szerkezetre, mely minden rezgés befejeztével ugrik egyet, tehát megmondja, hogy hány rezgés történt. Nos, az atomóránál a rezgéseket egy atom kvantumosan viselkedő elektronjai végzik, a számlálást pedig egy mikrohullámú rendszer elektronikája. A két rész visszacsatolási elemeket is tartalmazó összjátéka miatt az atom-órák ma a kísérleti fizika legpontosabb műszerei. Két atomóra, melyek egyszerre indítanak el, százezer év elteltével sem térnek el egymástól többel, mint egy másodperccel. A kereskedelmi forgalomba kerülő legjobb digitális kvarcórát úgy reklámozzák, hogy havonta nem téved többet, mint 5 másodpercet. Ez persze jobb, mint a régi mechanikus karórák pontossága, és jobb, mint amit a gyakorlati élet megkíván, de százezer évre extrapolálva ez 50 nap tévedést jelenthetne. Az atomóra 5 milliószor jobb. Érthető, hogy az atomóra megjelenése után a nemzetközi időbizottság 1967-ben a másodperc meghatározására atomórát választott, mégpedig a cézium 133-as izotópjával működő atomórát, megmondva, hogy 1 másodperc az az idő legyen, amely alatt a céziumóra egy meghatározott rezgést végez. Ennek az órának a pontossága: 10^{-12} .

– *Hogyan viszonyul ehhez annak a méternek a pontossága, amely a kripton-86 atom egy narancssárga vonalának hullámhosszára van alapítva?*

– A méter pontossága tízezerszer rosszabb, és mindjárt feltehetjük a következő kérdést: mi ennek az oka? Hiszen azt lehet gondolni, hogy a céziumatom és a kriptonatom egyaránt a kvantumfizika törvényeinek engedelmeskedik, tehát egyik sem rosszabb a másiknál. Ez így is van! A különbség abból ered, hogy a méter definícióját olyan kriptonban végbemenő gázkisülésre alkalmazták, amely nem koherens fényt ad. Ez azt jelenti, hogy a kriptonatomok sokaságában minden egyes atom a többitől függetlenül ad egy nagyon rövid ideig tartó sugárzást, és ezeknek összességében a rezgés megszakad, újra kezdődik, tehát nincs úgy, mint mondjuk a rádióban, ahol az adóállomás hulláma folytonos hullámsort képez. Ez utóbbi hullámot mondjuk koherensnek: ilyen az atomórának a koherens hullámsora.

Persze, 1960-ban még nem volt olyan fényforrás, mely koherens hullámsort adott volna, és ezért a nemzetközi bizottság az akkor legjobb eszközt választotta a méter meghatározására. De alighogy ezt a döntést meghozták, megjelent a lézer. A lézerforrást az különbözteti meg az ún. természetes fényforrásoktól, hogy fénye koherens, ugyanúgy, mint a rádióantenna sugárzása.

Így történt, hogy alig egy-két évvel a kripton alapú méterdefiníció elfogadása után már arról beszélgettünk a métertudományi intézetekben, hogy a lézerek segítségével jobb métermeghatározást lehetne adni. Erre két út kínálkozik.

Egyik az, hogy a lézer frekvenciáját (vagy hullámhosszát) stabilizálni kell. A lézer koherens, de még ha ugyanazt az atomi sugárzást használjuk fel, két lézer a körülményektől függően kissé különböző hullámhosszat ad. A hullámhossz reprodukálhatóvá tétele tehát az egyik út, és ezen az úton szerte a világban több laboratórium dolgozott. Az 1970-es évek elején volt is néhány lézertípus, melyek stabilitása, ha nem is volt olyan jó, mint az atomoráé, de sokkal jobb volt, mint a kripton-gázkisülés által adott hullámhossz. Megvolt tehát a törekvés, hogy ezek egyike legyen az új méterstandard.

Az én javaslatom ettől eltérő volt. Mint már említettem, 1964 folyamán olyan mérési eljárásnak a gondolatára jöttem rá, amely a lézereknek és a mikrohullámú technikának az összekapcsolásával lehetővé tette, hogy fényrezgesszámokat tudjunk mérni. Ez némi magyarázatot kíván.

A rádióhullámok rezgésszámai az ún. hosszúhullámok esetén a megahertz (MHz) nagyságrendjében vannak ($1 \text{ MHz} = 1 \text{ millió rezgés másodpercenként}$). Az URH rádió a 100 MHz-es tartományban dolgozik. Ha ismét ugrunk egy százaz faktort, akkor jutunk a centiméteres hullámok birodalmába. Egy rezgésszám, mely tízezer MHz, három centiméteres hullámnak felel meg. Nos, a fényrezgésszámok birodalma még tízezerszer messzebb van: a látható fény 40 000–80 000 rezgést végez az alatt, míg a 3 centiméteres mikrohullám egy rezgést ad.

– *Honnan tudjuk mindezt?*

– Onnan, mint már említettem, hogy ha ismerjük a fény sebességét és megmérjük a fény hullámhosszát, akkor ki tudjuk számítani a fény rezgésszámát. Persze, az így kiszámított rezgésszám pontossága attól függ, milyen pontosan tudjuk megmérni a hullámhosszat és főképpen: milyen pontosan tudjuk mérni a fény sebességét.

Ha azonban a fény rezgésszámát meg tudjuk mérni függetlenül a fény sebességétől, akkor ennek két előnye is van. Egyik az, hogy megmérve a hullámhosszat, ki tudjuk számítani a fény sebességét, mely a kettő szorzata. Mekkora lehet az így mért fénysebesség pontossága? Elvileg a rezgésszám mérése olyan pontos lehet, mint az atomóra, de a hullámhossz mérése nem lehet pontosabb, mint a jelenlegi méterdefiníció pontossága. Tehát a fény sebességét elvileg nem tudjuk jobban megmérni, mint a jelenlegi méter jósa-ga, azaz pontossága. Hogyan haladjunk innen tovább? Vezessük be az új hullámhossz-standardot a mai legjobb lézer segítségével? Akkor csak elodázzuk a problémát, mert ha a jövőben jobb lézereket készítenek, akkor hasonló helyzet előtt fogunk állni.

Ehelyett végleges megoldásra térhetünk át. Ez abban áll, hogy fogadjuk el a fénysebességet standard gyanánt. Ez a másodperc ismeretében – melyet az atomóra definiál – a méter definícióját adja, mert ha azt mondjuk, hogy a fénysebességet c méter per szekundumnak nevezzük, akkor a fénymásodperc hossza c méter. Úgy is mondhatjuk, *1 méter az a távolság, melyet a fény $1/c$ idő alatt tesz meg*.

– *Hogyan lehet a gyakorlatban alkalmazni az új métert?*

– Ennek többféle módja van. Például, a fényt vagy a mikrohullámot radarként alkalmazva megmérjük a jel futási idejét, s a távolságot a fénysebességből számoljuk. Nagyon jól tudjuk, hogy ez történik a földi radarban, de ez történik újabban a radarszolgáltatásban is. Ma a Föld–Hold távolságot fényradarral akkora pontossággal mérhetjük, hogy a 400 000 kilométer távolságban a hiba nem több mint 30–40 centiméter. Hasonló a pontosság a bolygók távolságának mérésében. Itt látszik legjobban az új módszer előnye.

A nagy távolságok mérése mellett az új rendszernek nagy az előnye a kis hosszúságok mérésében is. Ha megmérjük a fény rezgésszámát, akkor a standard fénysebességet a rezgésszámmal elosztva kapjuk az új méterben a hullámhosszat, amit interferométeres hosszúságmérésekre használhatunk.

Az új definíció tehát könnyen használható, és lényeges előnye, hogy a méter olyan pontos lesz, mint a másodperc. Ez a definíció végleges, a métert soha többé nem kell újradefiniálni.

– *Tapasztalt Ön komoly ellenállást a javaslatával szemben?*

– Óh, igen! Mindenekelőtt nagy küzdelem volt a múltban (és van még ma is²) azok részéről, akik a lézerstabilizálási munkában vettek részt, és akik a stabil lézereket javasolták hullámhossz-standardként. Maga a Bureau of Standards is sok éven át az én javaslatom ellen volt, és arra törekedett, hogy egy új hullámhossz-standardot fogadtasson el a nemzetközi fórummal. Más országok mérésiügyi kutatóitól is különböző ellenvetéseket lehetett hallani. Például ilyeneket: „... a fénysebesség a természetnek olyan állandója, amelyre nem lehet egy definiált értéket rákényszeríteni”. Persze, könnyű erre válaszolni: a kényszert a méter alkalmazzuk, mely által a fénysebességet kifejezzük. Olyan véleményt is olvashattunk a nemzetközi méterbizottság kiadványaiban, hogy „... a

² A hetvenes évek végén voltunk akkor. (S. Gy.)



A holdradar-kísérletet 1946-ban megvalósító kutatók egy csoportja négy évtizeddel később. Balról jobbra: Szemző Imre, Simonyi Károly (kissé takarva), Monostori László, Budincsevi Ándor, Bay Zoltán, Vámbéri Lőrinc és Bodó Zoltán. Fölöttük, a táblára írva az egy másodperc alatt megtett fényút: 299 792 458 méter

hosszegységnek az időegységre és a fénysebességre való vonatkoztatása olyan definíciót jelentene, ami hasonló a saját farkába harapó kígyóhoz”.

Persze, lehet komoly kritikát is alkalmazni a javaslattal szemben. Ez, mint már beszéltünk róla, arra a központi kérdésre vezethető vissza, hogy állandó-e a fény sebessége. A fizika a fénysebességet egyik „univerzális állandójának” nevezi. Ez az elnevezés a relativitáselmélet alapján jött létre, melynek az Einstein által adott értelmezése abból indul ki, hogy a fény sebessége független a vonatkoztatási rendszertől, bármi legyen is ennek a rendszernek a saját sebessége.

Tegyük fel, hogy kibocsátunk egy fényjelet, melyről tudjuk, hogy az üres térben mintegy 300 000 kilométerre távolodik el másodpercenként. Mi történik, ha a fényjel kibocsátása után magunk is mozgásban vagyunk úgy, hogy a fényjelet mintegy üldözzük? A naiv szemlélet azt mondja, hogy a fényjelnek hozzánk való sebessége kisebb lesz. Nos, a relativitáselmélet szerint, akárhogyan szaladunk utána, a fényjel mindig ugyanazzal a sebességgel szalad előttünk. Itt logikai ellentmondást sejtethetünk, holott nincs logikai hiba. A relativitáselmélet szerint az történik, hogy a mozgó rendszerben, ha azt egy másik rendszerből tekintjük, a távolságok rövidülnek, és az időfolyamatok lelassulnak.

Szerencsére, az elmúlt évtizedben olyan kísérleteket hajtottak végre, melyek alapján a relativitáselmélet érvényességét megerősítve látjuk. Ezek közül csupán kettőt említek. Egyik a gammasugárzást vizsgálja igen gyorsan forgó centrifugában. A centrifuga 500-szor fordul körül másodpercenként és a 10 centiméterre kihegyezett karon a gammasugár-forrás 300 m/s sebességgel szalad. Ennek a sugárzásnak a rezgésszáma mérhető módon kisebb lesz, a kísérletek szerint úgy, ahogy a relativitáselmélet előírja. Egy másik kísérletben rövid élettartamú mezonok futnak körbe mágneses térben. Ezek élettartama jól ismert kis sebességek esetén a laboratóriumban. Nos, közel fénysebességű mozgás közben a mért élettartam 12-szer hosszabb lesz, úgy, ahogy azt a relativitáselmélet követeli.

Ilyen, és más kísérletek igazolják az elmélet úgynevezett órátörvényét. A fénysebesség állandóságára pedig kitűnő bizonyítékokat szolgáltat a legújabb időkben nagy pontossággal kifejlesztett radarasztronómia. A Nap és vele együtt a bolygórendszer nagy sebességgel – másodpercenként mintegy 300–400 kilométerrel – mozog a csillagok közötti térben. Mégis, a mérések tanúsága szerint a radarjelek sebessége a bolygók között az *invariáns* fénysebesség, mintha csak állna a rendszer.

– *Állandó-e a fénysebesség olyan értelemben, hogy független a rezgésszámtól, azaz a fény színétől?*

– Szerencsére e kérdésben is lényegesen újat tudtunk meg az 1970-es évek elején egy kísérletben, melyet két texasi fizikus végzett. Inkább úgy kellene mondanunk, hogy a kísérletet a természet végezte el „az ember számára”, mintegy 7000 évvel ezelőtt. A természet felrobbantott egy szupernóvát, melynek maradványa egy szétfutó gázköd és egy összenyomott mag, egy gyorsan forgó neutroncsillag. A szupernóva fénye 1054-ben érte el a Földet, néhány hónapig a csillag olyan fényes volt, hogy nappal is látszott. Kínai csillagászok feljegyzései alapján a modern csillagászat megtalálta a maradványokat. A gyorsan forgó neutroncsillag egy pulzár. A fényimpulzusnak vörös, zöld és kék színű része egyszerre érkezik hozzánk a mérési hibán belül, ami a másodperc kicsiny tört része. A futási idő 6000 év, melyhez viszonyítva a kicsiny hiba 10-nek 17-ik hatványával kisebb. Ez azt jelenti, hogy a három különböző színű fény sebessége rendkívüli pontossággal megegyezik. Nem ismerünk semmi más mennyiséget a természetben, amelynek állandósága ekkora pontosságú.

Ezek alapján ismétlem: nincs okunk vonakodni az új mértérendszer bevezetésétől.

– *Hogyan áll jelenleg az új méter ügye?*

– A méterbizottság 1973-ban három lehetőséget javasolt az új méter bevezetésére: egy infravörös lézert, egy vörös fényű lézert, melyeknek a hullámhosszait megnevezi, ezenkívül megad egy új értéket a fénysebességre. Abban a kérdésben, hogy melyik mennyiség definiálja a három közül az új métert, nem foglal állást, de hozzáteszi, hogy ha a jövőben új hosszúságegység definíciójára kerül sor, kíváncsok, hogy olyan legyen, hogy a fénysebesség jelenleg javasolt értéke, a 299 792 458 m/s ne változzék.

– *Ez nem azt jelenti, hogy az Ön javaslatát fogadták el?*

– Nem, mert ezek csak javasolt, de nem elfogadott alternatívák. Látszik ugyan, hogy a bizottság már hajlik arra, hogy a fénysebességnek kitüntetett szerepet adjon, de állásfoglalás még nem történt.

– *Mit gondol, mi lesz a jövőben?*

– Nem tudom, mikor, de meggyőződésem, hogy a fénysebesség-re alapított egyesített téridő-rendszer lesz a jövő mérési rendszere.

– *Professzor úr, most mivel foglalkozik?*

– A fénysebességgel kapcsolatban a relativitáselmélettel. Abban az új méterjavaslatban, amiről beszéltem, a legfontosabb az, hogy tényleg állandó a fénysebesség. Annakra hozzászoktunk már a relativitáselmélettel kapcsolatban ahhoz, hogy a fénysebesség állandó, hogy nem is merjük ezt kifogásolni, holott a kísérleti fizikus soha nem nyugszik bele abba, hogy egy elmélet végleges, akár milyen szép is. Tehát én most azt vizsgálom, hogy melyek azok a kísérleti eredmények, amelyek – az elmélettől függetlenül – a fénysebesség állandóságát alátámasztják. Legújabbban arra jöttem rá, hogy a relativitáselméletnek egyik legjobb kísérleti bizonyítéka a radarcsillagászat. A Naprendszerrel tudjuk, hogy kb. 400 km/s sebességgel „szalad” a világűrben, erre kísérleti adatok vannak. Mégis, ha a szaladó Föld és a szaladó Jupiter között radarészlelést végzünk, kiküldünk jeleket és azok onnan visszajönnek, ez úgy megy végbe, mintha állna az egész! A fénysebesség állandó, függetlenül ettől a 400 km/s-os mozgástól.

– *Ha professzor úr kideríti, hogy a fénysebesség nem állandó, akkor öngölt lő!*

– Ez igaz, de akkor nemcsak az én javaslatom, hanem a fény hullámhosszára alapított méter is bajba kerül. Egyetlenegy eset volna, amikor az én javaslatom nagyobb bajba kerülne, mint a másik: ha a fény színétől függene a fénysebesség. Az viszont, mint már említettem, a pulzárok vizsgálatai alapján 10^{-17} pontossággal egyforma, akár a vörös, akár a kék fény terjedési sebességét nézzük. Sőt, még tovább is mehetünk, ha belevevünk a pulzárok röntgensugárzását. Ha egy egész kevés elméletet beleviszünk, azt, hogy a frekvenciának csak páros hatványától függhet a diszperzió, már 10^{-20} -ig állandó a fénysebesség. Amíg a méréstudomány el nem érkezik a 20 számjegy pontossággal, biztonságban vagyunk.

Kérdések: STAAR GYULA

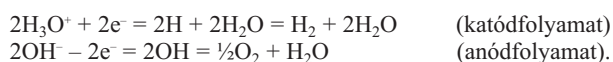
SCHILLER RÓBERT

Napfényből hidrogén

Hidrogéngazdaság – erről sokat írtak, írnak manapság, írtunk mi is. Az elemi hidrogénről van szó, erről a kényelmesen felhasználható, a környezetet tökéletesen kímélő energiahordozóról, amely felhasználáskor vízzé alakul, és amelyet vízből is elő lehet állítani. Ennél az utolsó szónál a lelkesedés egy kissé le szokott lohadni. Mert persze van módszer elegendő, amellyel hidrogénné és oxigénné bonthatjuk a vizet, de van-e közöttük iparilag könnyen megvalósítható, gazdaságos, meg olyan, amely nem árt többet a környezetnek, mint amennyi hasznot a hidrogén tiszta égése ígér. És a legnyomasztóbb kérdés: a vízbontáshoz energia kell, mi legyen ennek az energiának a forrása? Szén, olaj vagy földgáz? Hiszen épp ezektől akarunk szabadulni! Atomreaktor? Ebben a percben ez látszik talán a legközelebbi megoldásnak, de sok lenne itt is még a megoldanivaló, a világ pedig egyre nagyobb aggodalommal gondol a nukleáris energiára. Hanem a napfény! Ha arra lehetne a napsugárzást használni, hogy segítségével elemeire bontsuk a vizet. De hiszen lehet.

Lehet, persze, ha ... Épp csak tudnunk kell, hogy a természetben szigorúak a törvények. Se energiát, se elektromos töltést, se tömeget nem lehet csinálni. Bármilyen átalakulást hajt is végre az ember, bármi megy is végbe magától, az energiának vagy a tömeggel bíró anyagnak egyik fajtája átalakulhat egy másik fajtává, az egymás szomszédságában lakó töltéseket szétválaszthatjuk egymástól, el is vezethetjük valahová, de semmiből előállítani épp úgy nem lehet egyiket sem, ahogyan semmivé se lehet tenni őket.

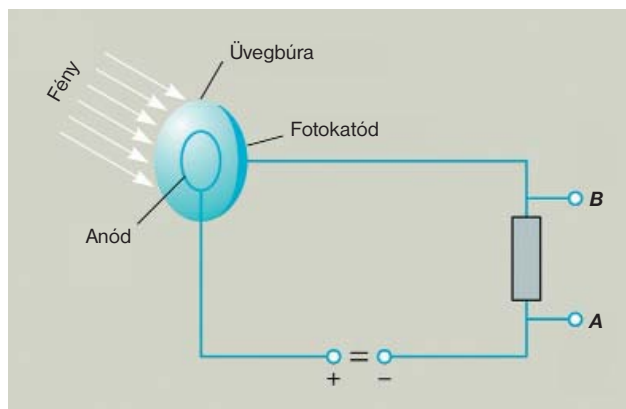
A víz bontásához elektromos áramra van szükség. Ehhez előbb töltéseket kell találnunk valahol, aztán ki kell őket szabadítani onnan, és el kell vezetni oda, ahol a víz molekuláit hidrogén- és oxigénmolekulákká alakítják. Más szóval, elektronokat kell vezetni a víz disszociációjából származó H_3O^+ -ionokhoz, elektronokat kell elvinni az OH^- -ionoktól. Az egyszerű (úgy értem, papírra kevés betűvel felírható) folyamat ennyi:



A régi zseblámpákba való laposelemek érintkezőit vízbe merítve pezsegni kezdett körülöttük a víz, hidrogén fejlődött a katód, oxigén az anód felületén. Az áramforrás elektromos energiája átalakult a gázok kémiai energiájává. Röviden szólva, elektrolizáltuk a vizet. Ehhez azonban a feszültségnek nagyobbak kell egy meghatározott értéknél lennie: ezt hívják a víz bomlásfeszültségének.

Régóta tudjuk, hogy napsugárzás is kelthet elektromos áramot – fotoelektromos átalakító az erre szolgáló berendezés neve. A legelső ilyen készülék a vákuum fotocella volt (1. ábra).

Ebben a berendezésben a beeső fény elektronokat szabadít ki a fémből. Minden fémbe elektronok sokasága mozog szabadon a pozitív fémionok között. Ha egyik vagy másik elektronba beleütök egy olyan foton, amelynek elegendően nagy az energiája, úgy az elektron leküzdözi az ionok vonzását és kilép a vákuumba. Áram azonban csak akkor folyik, ha egy elektromos tér a szabaddá vált elektront a pozitív elektróda felé söpri. A vákuum fotocellában egy külső feszültségforrás szolgáltatja a teret. Az ilyen berendezések igen alkalmasak a fényintenzitás mérésére, a fényenergia gazdaságos átalakítására azonban kevésbé valók.

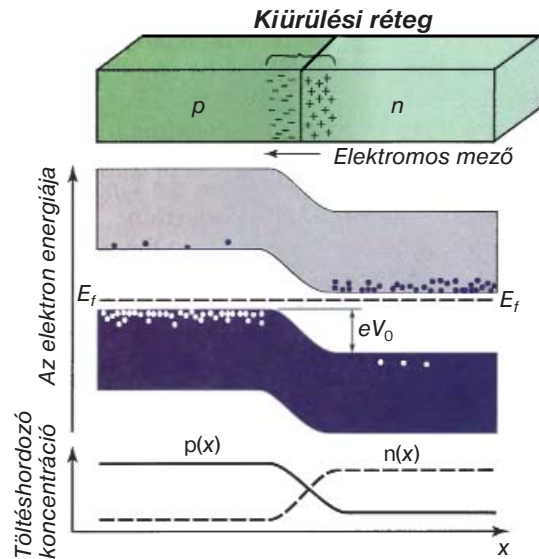
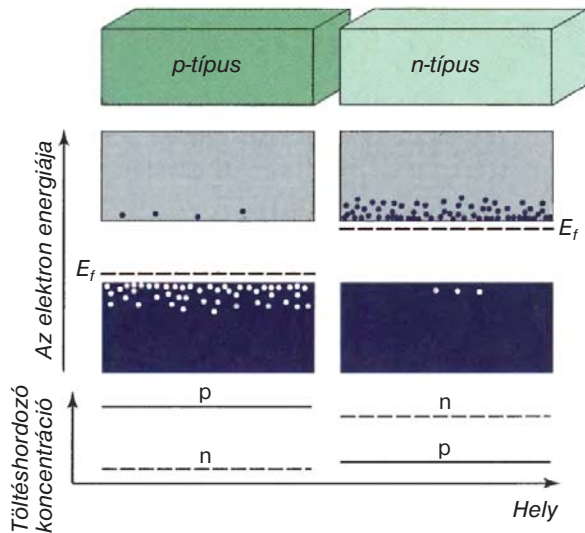


1. ábra. Vákuum-fotocella (Forrás: https://www.mozaweb.hu/Lecke-FIZ-Fizika_10-Elektromos_aram_gazokban_es_vakuumban-99788)

A félvezetők fizikája új módszereket nyitott meg. Félvezetők-ből ugyanis lehet olyan fényelektromos szerkezeteket létrehozni, amelyek működéséhez nincsen szükség külső feszültségforrásra. Az elektromos tér az anyag belsejében, annak felépítése okán alakul ki. Akár egy lépcső egy házban: ha egyszer megépítették, ott marad. Félvezető anyagokban, amilyen például az elemi szilícium, éppen úgy szabadon mozognak az elektronok, mint a fémekben. Majdnem éppen úgy. A fontos különbség abban áll, hogy a félvezető elektronjainak az energiája sokféle lehet ugyan, de nem lehet akármekkora. Itt is vannak alapállapotok és gerjesztett állapotok mint az atomokban; az egyes állapotok között itt sem folytonos az átmenet, vannak energiaszintek, amelyeket az elektronok soha el nem érhetnek. A félvezetők alapállapotú energiaszintjeinek sokaságát vegyértéksávnak, a gerjesztett szintekét vezetési sávnak hívják. A közöttük húzódó, elektronok számára elérhetetlen energiatartomány neve tiltott sáv. A fényt akkor tudja elnyelni a félvezető, ha a foton energiája legalább akkora, mint a tiltott sáv szélessége. Ebben az esetben egy elektron átlép a vegyértéksávból a vezetési sávba, és ebben az energiaállapotában részt tud venni az elektromosság vezetésében. Innen az energiaállapot neve. Azok az elektronok, amelyeknek az energiája a vegyértéksávba esik, nem vezetnek az áramot. Itt tehát nagyon más a helyzet, mint a vákuum cellában. Az elektront nem löki ki a fény a szilárd anyagból, hanem az anyagon belül teszi mozgékonyvá. És nem kell külső elektromos tér az elmozdításához, az anyagban létrehozott potenciállépcső megfelel a célnak.

A félvezetők sávszerkezetét csekély mennyiségű ötvöző anyag hozzáadásával meg lehet változtatni. Ha például kevés elemi bört juttatunk a szilíciumba, az elektronok átlagos energiája kisebb, ha kevés elemi foszfort, nagyobb lesz, mint a tiszta kristályban. A börtartalmú szilíciumot p-típusú anyagnak, a foszfortartalmú n-típusúnak nevezik a félvezető fizikában. Az eltérő elektronenergiák miatt egy börtartalmú és egy foszfortartalmú szilíciumkristály határán (ezt p-n átmenetnek hívják) energiaküszöb, más szóval elektromos potenciálkülönbség alakul ki (2. ábra).

Ezt a potenciálkülönbséget hasznosítják a fény átalakításában elektromos energiává. Ha egy p-n átmenetre olyan színű fény esik,



2. ábra. Félvezető energia sávszerkezete, p-n átmenet vázlata (E_f az átlagos elektronenergia) (Forrás: http://titan.physx.u-szeged.hu/~dpiroska/honlap_exe_en/felvez/felvezet_tmenetek.html)

hogyan a fotonok energiája eléri vagy meghaladja a tiltott sávét, töltések lépnek át a vegyértéksávból a vezetési sávba, és ezek az átmenetben uralkodó potenciálkülönbség hatására elmozdulnak, elektromos áram folyik a megvilágított félvezetőben. Ilyen elven működnek a ma már széles körben használt, gazdaságosnak bizonyult, az energetikai gyakorlatban elterjedt fénylektromos átalakítók.

(A leírás rövid és vázlatos, tehát részleteiben elkerülhetetlenül hamis. A cikk azonban nem a félvezetők fizikájáról kíván szólni.)

A fénylektromos átalakítók a fényszerű energiát az ellentétes elektromos töltések közti vonzás leküzdésére, a felszabadult töltések elmozdítására fordítják – fényből elektromos áramot csinálnak. Ennyiben tehát lehetséges volna, hogy a napsugárzást vízbontásra használjuk. Félvezető fénylektromos átalakítók villamos energiáját kell felhasználni a víz elektrolízisére. Ennek nem volt már régen se elvi, se műszaki akadálya – gazdasági hátránya annál in-

kább. Az eljárás egyszerűen nem volt kifizetődő, semmi módon nem volt versenyképes a hidrogén-előállítás hagyományos módsze-

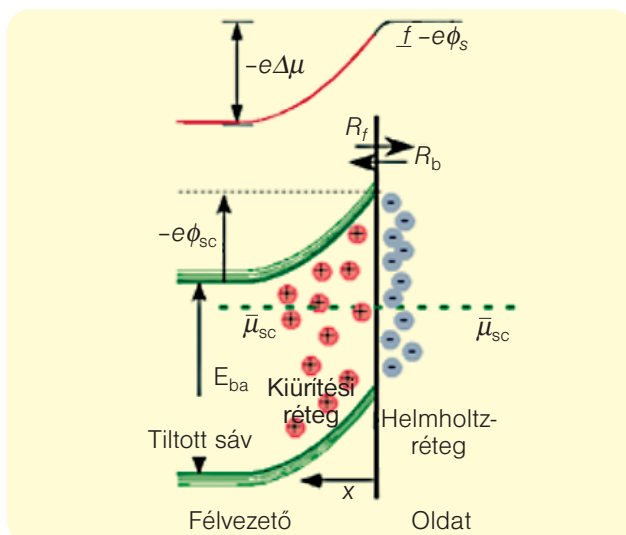
reivel. Van azonban más lehetőség is. Potenciálkülönbség, az anyagba beépített potenciálküszöb hasonló a p-n átmeneten kialakulóhoz, olyan esetben is létrejön, amikor egy félvezető anyag vizes oldatba merül. Ezt az okozza, hogy a félvezetőkristály elektronjainak az átlagos energiája más, mint a vizes oldat ionjaiban lévő elektronoké. Nagyon hasonlóan ahhoz, ahogyan a p- és n-típusú anyagok határán kialakul egy potenciállépcső. A szilícium éppen sárgával nem alkalmas rá, de más kristályokkal meg lehet figyelni, hogy a szilárd anyag és a folyadék határán megvilágítás hatására áram folyik. Ráadásul a fény a potenciállépcső magasságát is megváltoztatja. Ezt az úgynevezett fotoelektrokémiai hatást lehet egyes esetekben vízbontásra használni (3. ábra).

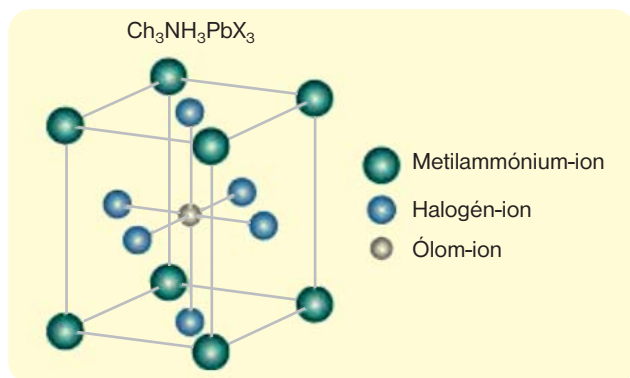
A megvilágított félvezető, aszerint hogy p- vagy n-típusú, elektronokat juttat az oldatba, vagy elektronokat vesz el onnan. A fotoelektrokémiai effektus így vagy a katódos, vagy az anódos folyamatot segíti. Ezt a jelenséget először két japán kutató, *Fujishima* és *Honda* használta fel vízbontásra. Egy ásványt, a TiO_2 összetételű rutilt n-típusú félvezetővé alakították, a vízbontó cella másik elektródája platina volt. Úgy tapasztalták, hogy külső feszültségforrás nélkül, pusztán azzal, hogy a rutilfelületet megvilágította a napfény, huzamos és tartós üzemen keletkezett semleges vizes oldatban, oxigén a félvezetőn, hidrogén a platinán.

Az elvet tehát igazolták, a keletkező hidrogén hozama azonban csekély volt, az ipar nem is érdeklődött az eljárás iránt. Hiszen sok követelményt kell egy jól működő cellának kielégítenie. A félvezető tiltott sávjának olyannak kell lennie, hogy a napsugárzás fotonjainak jó része átsegíthesse rajta az elektronokat. Ezt a követelményt a rutil már nem elégítette ki, itt csak az ultraibolya tartomány volt aktív, abból pedig kevés van a napfényben. Ha nem akarjuk, hogy a folyamat külső feszültségforrásra szorúljon, olyan félvezető/oldatpárt kell találnunk, amelyet megvilágítva a víz bomlásfeszültségénél nagyobb feszültségkülönbség alakul ki. Ezen felül a félvezetőnek még stabilisnak is kell lennie az oldattal érintkezve, akkor is, ha fény éri. Már pedig fény hatására könnyen átalakul a vízben a kristály – ez a fotokorrózióknak nevezett folyamat sok próbálkozásnak lett a végzete.

Az utóbbi időben egy új félvezető anyagcsoport ragadta meg a kutatók figyelmét: a perovszkitok. A nevét ez a vegyületcsoport a perovszkit nevű ásványtól, a CaTiO_3 összetételű kalcium-titanáttól

3. ábra. Félvezető és vizes oldat határrétegének vázlatos energiatérképe, μ_{sc} az átlagos elektronenergia félvezetőben, μ_s az oldatban (Forrás: <http://www.google.hu/imgres?imgurl=http://www.ccisolar.caltech.edu/images/>)





4. ábra. Perovszkit kristály rácsszerkezete (Perovskite solar cell – a Wikipedia nyomán)

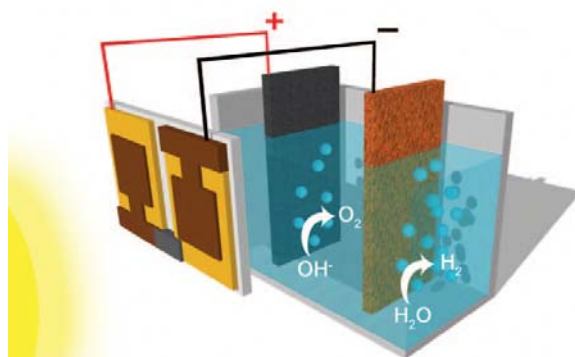
kapta. Ennek a kristályszerkezete jellemző a vegyületekre, összetételük azonban nagyban eltér az ásványétól. Igen sokféle anyag tartozik közéjük, a legfontosabbakat szerves és szervetlen kationok együtt építik fel. Kristályszerkezetüket a 4. ábra mutatja.

A fotoeffektust a $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ összetételű metil-ammonium-ólom-trijodid són kezdték tanulmányozni. Hamar kiderült, hogy a metil-ammonium-csoportot más, nagyméretű organikus kationra is ki lehet cserélni, hogy jód helyett részben vagy egészben más halogenidion is beépíthető, és hogy ólom helyett ön is lehet alkalmas inorganikus kation. Ez a nagy változékonyság lehetővé teszi, hogy a fényhasznosítás dolgában lényeges tiltott sáv szélességét is, a vezetési sávban mozgó töltések tulajdonságait is könnyen befolyásolják.

A szilícium alapú fotovillamos átalakítókat ma alaposan tanulmányozzák, hatásfokuk – az elnyelt fényenergia és a keletkező elektromos energia hányadában kifejezve – meglehetősen jó, gyártásuk iparilag jól megvalósított. Van-e szükség itt új anyagokra? A perovszkitokat azonban könnyebben, olcsóbban lehet előállítani mint a szilíciumrétegeket, mert gyártásuk se magas hőmérsékletet, se szigorú vákuumtechnikai körülményeket nem igényel. Hétköznapi nedves technológiai módszerek, a kémiai laboratóriumok szokásos feltételei itt elégségesnek bizonyulnak. A perovszkitok hatásfokát látványosan sikerült növelni: néhány év alatt a kezdeti 3%-ról 2015 nyaráig 20% fölé emelkedett a hatásfokuk. Ez már közel van az anyagcsalád elméleti maximumához, a 31%-hoz. Hátányok? Eddig körömnnyi nagyságú celláknál nagyobbakat még nem sikerült előállítani. És az anyag nagyon érzékeny a nedvességre. Így tehát meglehet, hogy fotovillamos átalakítóként sikeresen versenyezhetnek majd a szilíciumcellákkal, de vízbontásra aligha használhatók.

És mégis! Közvetlen vízbontásra, mint ahogyan a rutilelektrodtól remélték, a perovszkitok valóban nem alkalmasak. Az utóbbi évtizedekben azonban nemcsak a fotovillamos átalakítók tudó-

mánya fejlődött, hanem a víz elektrolízis módszerei is nagyot változtak. Katalizátoranyagokkal borítják mind az anód, mind a katód felületét, így könnyítve meg a hidrogén és az oxigén fejlődését. Megnövekszik ettől az elektrolízis hatásfoka. Legutóbb Grätzel és munkatársai nagyfelületű nikkel-vas-hidroxid-réteggel bevont katódot és anódot használtak, ez az anyag mind az anódos, mind a katódos folyamatot katalizálja. Az elektrolizáló feszültséget egy nagy hatásfokú perovszkit átalakítóból nyerték. 2014 őszén, amikor tehát a perovszkitcellák még kisebb hatásfokkal működtek mint ma, a napenergiát 12,3% hatásfokkal tudták hidrogéngázzá alakítani.

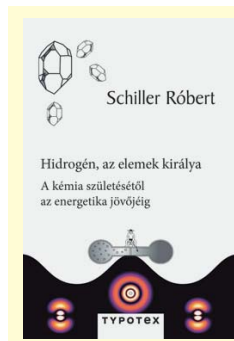


5. ábra. Perovszkit alapú fotoelektromos átalakító (balra) és vízbontó cella (Forrás: http://www.researchgate.net/profile/Jingshan_Luo/publication/266208328_Water_photolysis_at_12.3_efficiency_via_perovskite_photovoltaics_and_Earth-abundant_catalysts/links/54358ca30cf2643ab98679867af0.pdf)

A cikk elején azt írtuk, hogy az ilyen kettős cellák nem gazdaságosak, többre lehet jutni azzal, ha az anódot vagy katódot világitjuk meg, és a fotoelektrokémiai folyamatokat használjuk vízbontásra. Ez a gondolat vonzónak tetszett, de úgy látszik, egyelőre nem valósítható meg kielégítően. Azonban mind a fényátalakítók, mind az elektrolizáló berendezések fejlődése odáig jutott, hogy az olyan kettős cellákra, amilyen az 5. ábrán látható, már mint reális lehetőségre kell gondolni. Így vélik legalábbis a laboratóriumokban. A többit majd az ipar mondja meg.

Irodalom

- V. A. Myamlin, Yu. V. Pleskov, *Electrochemistry of Semiconductors*, Plenum Press, New York 1967
H. O. Finklea (editor), *Semiconductor Electrodes*, Elsevier, Amsterdam 1988
M. Grätzel, *Photoelectrochemical Cells*, Nature 414, 338 (2001)
M. A. Green, A. Bailie, H.J. Snaith, The emergence of perovskite solar cells, *Nature Photonics* 8, 506 (2014)
Jingshao Luo és mtsai, Water photolysis at 12,3% efficiency via perovskite photovoltaics and Earth-abundant catalysts, *Science* 345, 1593 (2014)
A. Walsh, Principles of chemical bonding and band gap engineering in hybrid organic-inorganic halide perovskites *J. Phys. Chem. C* 119, 5755 (2015)

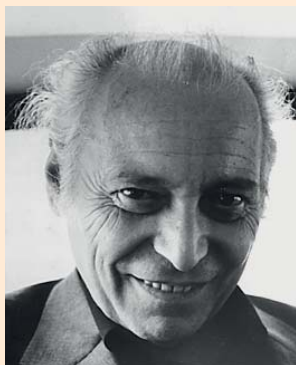


Szerkesztőségünk könyvajánlása

A könyv öt fejezetből áll. Az első (A természettudomány felé) mindenekelőtt a kémia önálló tudománnyá válásának történetét meséli el Paracelsus, Robert Boyle és a kémia francia atyja, Antoine Laurent Lavoisier életének és munkájának felelevenítésével. A második, a kötet felét kitevő fejezet (Kémia és fizika között) középpontjában már a fizikai kémia áll. A harmadik fejezet (Merre és milyen gyorsan?) a kémiai egyensúly és a reakciókinetika fogalmait vezeti be, s itt a műtrágyagyártás gyakorlati jelentősége miatt az ammónia szintézise válik központi kérdéssé. A negyedik fejezet (Úrvegytan) a kozmoszról szerzett kémiai ismereteket ürügyként felhasználva bemutatja a spektroszkópiai módszereket, illetve a feketetest-sugárzás jelenségét. Az ötödik fejezet (Hidrogén és energia) izgalmas és fontos kérdése: hogyan lehetne hidrogént felhasználni az energiagondok megoldására.

KAJTÁR MÁRTON

Miért piros a paprika?



Kajtár Márton (1929–1991) 1952-ben szerzett vegyész oklevelet az Eötvös Loránd Tudományegyetem. Negyven éven át, 1952-től egészen haláláig, az egyetem Szerves Kémiai Tanszékén dolgozott, ahol 1960-ban lett adjunktus, 1969-ben docens, majd 1987-ben egyetemi tanárrá nevezték ki. Bruckner Győzőnél 1959-ben peptidkémiből doktorált. A kandidátusi fokozatot 1967-ben, az akadémiai doktori fokozatot 1986-ban szerezte meg. Ugyanebben az évben Akadémiai Díjat kapott. 1970-ben hosszabb időt töltött Németországban Günther Sznatzke professzor laboratóriumában. A kiroptikai szerkezetvizsgálati módszer hazai meghonosítója és vezetője volt. Nemzetközi folyóiratokban több száz dolgozata jelent meg. Tudományos munkásságával egyenértékűnek, talán még fontosabbnak is tartotta tanári tevékenységét. A hazai középiskolai kémiaoktatás megújítója volt. Nagy súlyt fektetett a tudományos népszerűsítésre is. Számos, remek stílusban megírt ismeretterjesztő dolgozatának koronája, különleges, egyedülálló szerves kémiai tudományos ismeretterjesztő könyve a kétkötetes Változatok négy elemre, mely a Gondolat Kiadó gondozásában 1984-ben jelent meg. Ezek az ismeretterjesztő írások, így az itt közölt Miért piros a paprika? című, ma is

ugyanolyan frissen hatnak, mint évtizedekkel korábban, megírásuk idején. A Természet Világa szerkesztőbizottságának 1969-től haláláig hűséges, segítőkész tagja volt.

Az ELTE látványosi kémiai épületében a hallgatók számos előadásukat a Kajtár Márton Teremben hallgatják. Kaposvár városa emléktáblával tisztelte Kajtár Márton emléke előtt. Az emléktábla a Dózsa György út 16. falán látható. E ház helyén állt egykoron az a lakóépület, ahol Kajtár Márton szüleivel 1945 és 1952 között élt.

Tomasz Jenő

A magyar paprikát a világon mindehnyire ismerik. Van csípős és van édesnemes, de – ami a fő – a paprika piros, mint a rubin. A paprikában van egy kapszaicin nevű anyag, attól csípős, és egy kapszorubin nevű, attól piros. (Mindkét név a paprika latin nevéből – *Capsicum annuum* – származik.) A két vegyület kémiai képletében a szén- és hidrogénatomokat nem jelöltük külön, csak a szénvázat rajzoltuk le. A vonalak minden megtörése, meg a végei egy-egy szénatomot jelentenek, s hozzá annyi hidrogénatomot, hogy a szénatomnak mind a négy vegyértéke lekötött legyen (1. ábra).

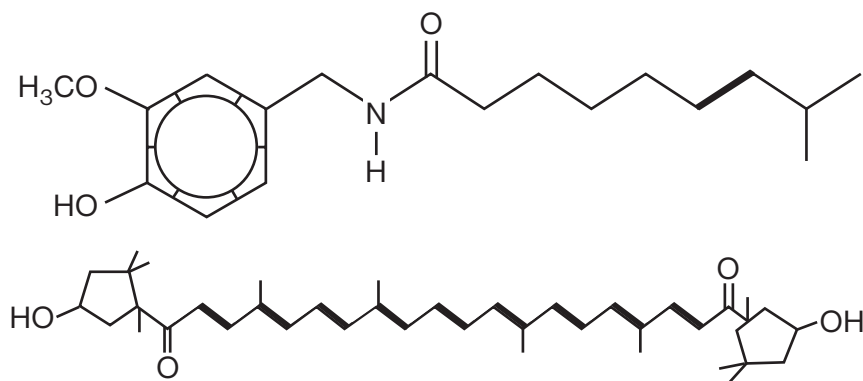
Most már tudunk két nevet, láttunk két képletet, de hogy miért csípős és miért piros a paprika, azt ebből még nem tudjuk. „Tájékozottabbak” lettünk, de nem értettünk meg semmi újat a Természetről. Ismerjük be, így van ez tudásunk nagy részével. Sok mindent „megtanulhatunk”, mindent tudomásul vehetünk, de igazi tudást csak a megértés ad! Mit jelent hát megérteni valamit? Megkockáztatjuk ezt a választ: akkor értünk meg egy jelenséget, ha világosan látjuk a kapcsolatát a legáltalánosabb természettörvényekkel. Próbáljunk ilyen igénnyel közeledni a fenti kérdésekhez.

Mindenekelőtt tisztázzuk korlátainkat. A látás is, meg az ízérzés is bonyolult idegrendszeri működés. Ennek lényegét kezdjük ismerni, de a részletek még ismeretlenek. A csípős íz „megértéséről” egyelőre le kell mondanunk. (Bár gyakorlati szempontból az is nagyon értékes ismeret, hogy tudjuk, a paprikában megtalálható sokféle anyag közül melyik az, amelyik a csípős ízt kiváltja. De a szerkezet és a hatás közötti összefüggést ezzel még nem értettük meg!)

A színt mindenesetre jobban értjük, mint az ízt. Induljunk ki abból a fizikai-élettani tényből, hogy egy testet akkor látunk pirosnak, ha a szemünkbe annak felületéről csak 750 nm hullámhosszú (vörös) fény jut, vagy ha a test felületéről visszaverődő és onnan a szemünkbe jutó, 400–800 nm hullámhosszú „fehér” fénykeverékből csak az 500 nm hullámhosszú (zöld) fény hiányzik. (Ezért kiegészítő színek a vörös és a zöld.) A színérzékelés biológiai mechanizmusával most nem foglalkozunk.

A paprika tehát azért piros, mert a felületéről visszaverődő és a szemünkbe jutó napfény „hiányos”, hiányzik belőle a zöld fény. Vagyis a kapszorubin-molekula szerkezete olyan, hogy az a Nap fehér fényéből éppen a zöld fényt nyeli el – de miért?... Mert a benne levő festékanyag molekulái a fehér fényből kiválogatják a zöld fény fotonjait, csak az azoknak megfelelő energiakvantumokat tudják elnyelni. Az anyagoknak azért

1. ábra. A kapszaicin és a kapszorubin egyszerűsített képlete





A paprikában van egy kapszaicin nevű anyag, attól csípős, és egy kapszorubin nevű, attól piros

van színe, mert bizonyos energiakvantumot át tudnak venni a fénytől, mást meg nem. Ha minden anyag bármilyen energia-kvantumot felvehetne, akkor minden „szín” a fekete és a fehér között változnék. Szürke lenne a világ! (Vagy az egész fénymeny-nyiséget elnyelné, akkor fekete volna, vagy csak egy részét – de válogatás nélkül! –, akkor meg szürke; ha semmit nem nyel el, akkor fehér, ill. átlátszó.)

Milyenek a molekulák?

Az a nagyon fontos tapasztalat, hogy az anyagok színesek, vagyis hogy nem egyformán lépnek kölcsönhatásba a fénnel, hanem bizonyos színű fényt – bizonyos energiakvantumokat – elnyelnek, másokat nem, a „kézzelfogható” anyag sajátosságaira is egészen új fényt vet.

A legtöbb anyag molekulákból, egy molekula atommagokból és elektronrendszerből épül fel. A molekula az atommagok és elektronok stabilis, időben állandó, szervezett rendszere. A fénnel mégis kölcsönhatásba lép, de nem akárhogyan. Megfelelő energiaadagokat átvethet a fénytől, de annál kisebbet vagy nagyobbat nem. Ha többfélét is, nem akármilyen! Ha egy molekula elnyel egy energiaadagot, ezáltal több lesz az energiája. Abból, hogy egy molekula nem vehet fel akármekkora energiaadagot, következik, hogy a molekula energiája nem lehet akármennyi. Pontosabban: a molekula energiája is csak meghatározott adagokban, kvantumokban változhat.

A molekula energiája részeinek kölcsönhatásából származik. A molekulát alkotó atommagok taszítják egymást. Ugyanígy az elektronok is. A magok viszont vonzzák az egyensúlyá alakítja ki a molekula helyzeti energiáját. A magok és elektronok szüntelen mozgást végeznek: ebből származik

a molekula mozgási energiája. A helyzeti és mozgási energia összege a molekula „összes energiája.”

Amikor a molekula elnyel egy fénykvantumot, megváltozik a magok és elektronok kölcsönös elrendeződése, vagyis a molekula állapota, s ezért megnövekszik a rendszer energiája. (Pl. az elektronok vagy azok egy része távolabb kerül a magoktól.) Abból, hogy akármilyen energiát nem vehet fel a molekula, arra következtethetünk, hogy a magok és elektronok rendszere nem lehet akármilyen állapotban. (Pl. az elektronoknak a magokhoz viszonyított helyzete nem változhat meg akármilyen picit.) Csak hirtelen, ugrásszerűen változhat. Vagy ilyen, vagy olyan. Az állapotváltozáshoz pontosan adott energiára van szükség, ezt nyeli el a fényből. Ennél kevesebb energiával nem jut semmire, de többel sem tud mit kezdeni. Vagy megmarad az „alapállapotban”, vagy hirtelen ugrik át egy minőségileg más, ún. „gerjesztett” állapotba. A molekula lehetséges állapotai is „kvantummosak”. Két lehetséges állapot energiája közti különbség egy pontosan meghatározott energiakvantum. *Tehát a molekula sokféle állapotban lehet, de nem akármilyenben. Ez a kvantumelmélet lényege.*

Ilyesmire a közönséges méretek birodalmában nem vagyunk hozzászokva. Megszoktuk, hogy a tárgyak állapota – ha tesszük, energiája – folytonosan változhat, akármilyen lehet. Autónk sebességét akármilyen kicsivel megváltoztathatjuk. A csapból kiáramló vízsugarat is beállíthatjuk tetszésünk szerint. De tudomásul kell vennünk, hogy az atomok és molekulák világában nincs folytonos átmenet egyik állapotból a másikba...

Elektron a dobozban

Képzeljünk el egy elektront, amely be van zárva egy „dobozba”. A „doboz” jelenti, hogy az elektron a térnek csak egy megha-

tározott részén lehet. Azon belül semmiféle erő nem hat rá, de azt a térrészt el nem hagyhatja. Legyen a „doboz” ráadásul „egydimenziós”, ami mindössze azt jelenti, hogy az elektronnak egy vonalszakasz áll rendelkezésére. (Ilyesmi – szigorúan, geometriai értelemben véve – nem valósulhat meg, de így egyszerűen kezelhető a probléma.) Az L hosszúságú vonalszakaszon belül tartózkodhat az elektron, de azt el nem hagyhatja. Az elektronnak az „egydimenziós dobozon” belül semmiféle vonzó vagy taszító erő nem hat, mégis az elektron a dobozban is „sokféle, de nem akármilyen” állapotot vehet fel. Helyzeti energiája nem változhat, mert nincs neki; a doboz minden erőhatástól mentes. Változhat viszont a mozgási energiája. A dobozba zárt elektron lehetséges állapotait tehát mozgási energiájának változó értékei jellemzik; ez sokféle lehet, de nem akármekkora...

Vizsgáljuk tovább eléggé „absztrakt”, de legalább egyszerű modellünket: az egydimenziós kalitkába zárt elektront. Az anyag háromdimenziós, legalábbis ez a kép felel meg mindennapi szemléletünknek. Ha a valósághoz közelebb álló modellt akarunk készíteni, zárjuk legalább háromdimenziós dobozba az elektront. Az előbbi gondolatmenet ahhoz az eredményhez vezetne, hogy az elektron lehetséges állapotait most háromdimenziós állóhullámokkal modellezhetjük, s a lehetséges energia-állapotokat most három-három *egész számmal* jellemezhetjük. Itt a három kvantumszám! Hiszen ezt tanulja minden elsős gimnazista a kémiában: „Az atomban kötött elektron állapotát három kvantumszámmal jellemezhetjük”. Az atomban *kötött* elektronnak a mag vonzása a „háromdimenziós kalitkája”. A mag vonzása nem engedi, hogy eltávolodjék, az tartja a „dobozban”, vagyis az atomon belül. Az összefüggések a hidrogénatom esetében formailag kicsit módosulnak, mert a mag centrális vonzása gömb alakú kalitkát létesít az elektronnak, de a lényeg mégis ugyanaz: a lehetséges elektronállapotokat – kvantumállapotokat – háromdimenziós állóhullámok írják le. A sokféle, de nem akármilyen állapotnak ezek a modelljei, a mintái.

Konjugált poliének

Térjünk vissza végre a paprikához. A színeért felelős kapszorubin-molekula nagyon bonyolultnak látszik, bizonyos tekintetben mégis egyszerű: van benne „egydimenziós doboz” – egydimenziós „kifutópálya” – az elektron számára. (Ezt hívjuk komolyabb szóval molekulapályának.)

Nézzük meg jól az 1. ábrát, emeljük ki a molekula középső részletét, és vizsgáljuk meg alaposabban. A váltakozó egyes- és kettőskötéseket tartalmazó szénláncot nevezzük *konjugált láncnak*. A kapszorubin-

molekula közepén tehát egy meglehetősen hosszú konjugált láncrészlet található. Törődjünk most csak ezzel. A két gyűrű a molekula két szélén a szín szempontjából érdektelen. A sok konjugált kettőskötést tartalmazó vegyületeket *konjugált poliének*-nek nevezzük.

Írjuk le részletesebben a fenti vonalas képletet – legalábbis annak egy részletét –, de hagyjuk ki belőle a kettőskötéseket (**2. ábra**). Mit szimbolizál ez a képlet? A H betűk egy-egy meztelen protont (a hidrogénatom esetében az atomtörzs az atommaggal azonos), a C betűk meg a 6 pozitív töltésű magot, beburkolva két elektronnal, amelyeket olyan szűk kalitkába zár a mag erős vonzása, hogy a kémia számára hozzáférhetetlenek. A kémikus ezért a C betűvel ezt a kifelé már csak 4 pozitív töltést hordozó mag–elektron együttest, a szénatomtörzset jelöli.

A kapszorubin hosszas kutatómunkával felderített molekulaszervezete azt mutatja, hogy a molekula középső láncrészletében az atomtörzsek úgy rendeződnek el, hogy egy-egy szénatomtörzset nem a maximális négy, hanem csak három másik atomtörzs (szénatomtörzs vagy proton) vesz körül. Az elrendeződés szép szimmetrikus: a központi szénatomtörzset az egyenlő oldalú háromszög szimmetriája szerint veszi körül a vele egy síkban levő három másik atomtörzs. A „cikcakkos” molekularészlet valamennyi atomtörzse egy közös síkban van.

A kötővonalak – mint tudjuk – elektrónpárokat jelentenek, amelyek nem egy-egy, hanem két-két szomszédos atomtörzs „bűvkörében” vannak. Ezek a kötő elektrónpárok (σ -állapotú elektrónpároknak nevezzük őket) jól be vannak zárva a két szom-

szédos atomtörzs erős vonzásának szűk kalitkájaiba. Szinte oda vannak cövekelve az erőterbe. Kimozdítani őket onnan nagyon nehéz. Az elektrónpárok taszítják egymást, ezért rendeződnek el úgy, hogy az egy atomtörzs körül levők a sík három irányába (kerekén 120° -os szögekbe) taszítják szét egymást. Így juthat a túlságosan összezsúfolt elektrontársadalom viszonylag a legtöbb helyhez.

Amit eddig lerajzoltunk, vagyis az atomtörzsek és az ún. σ -elektrónpárok rendszerét nevezzük a polién-molekula σ -vázának. Rajzoljuk le ezt az σ -vázat egyszerűbben. Az egész olyan, mint egy laposan szétterülő, tömör elektronfelhő, amelyből azonban még minden széntörzs körül kisüt, kisugárzik a széntörzsek még kompenzálatlan „negyedik” pozitív töltése (**3. ábra**).

Ha létezne egy ilyen σ -váz önmagában, s ahhoz messziről egy „kóbor” elektron közeledne, az valami olyasfélért „látna” benne, mint a korábban emlegetett „egydimenziós doboz”. Azt „érezné”, hogy valami hosszú, elnyúlt pozitív erőter vonzza. A síkban tömörülő sok elektron valahogy egybeolvasztja az elektronnal még kielégítetlen atomtörzsek külön-külön vonzását, s a σ -váz úgy hat, mint egy hosszúkás, egy irányban elnyúlt „egydimenziós” pozitív erőter.

Mi történik hát a „kóbor” elektronnal? A magok közvetlen közelébe nem kerülhet, mert a magok közös síkja úgy meg van tömve a σ -elektronokkal, hogy ott már minden hely foglalt. A még nem teljesen kielégített magok vonzása csak a σ -elektronok árnyékoló „ernyőjén” át, nagyjából egybeesővé válik. Az elektron úgy tehet eleget a magok vonzásának és a többi elektron taszításának, hogy olyan helyet tölt be, ahol

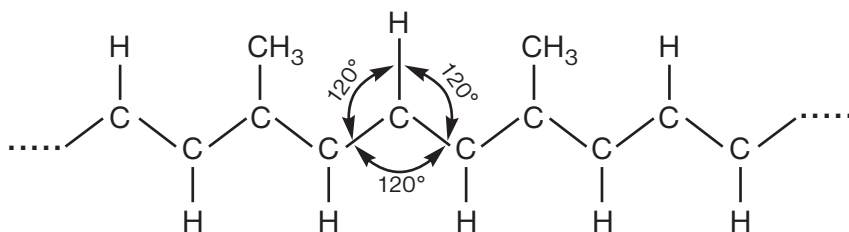
más elektron nincs, de a magvonzás még érezhető; ezért a σ -váz fölött és alatt helyezkedik el, a széntörzsek láncának vonalában. Ezt az elektronállapotot, amikor az elektron éppen a magok közvetlen közeléből, a magok síkjából van kitiltva (a többi elektron által), π -állapotnak nevezzük. A hosszú, konjugált szénlánc σ -vázára telepedő elektron nemcsak egy vagy két szomszédos atomtörzs erőterére zsugorodik össze, hanem szétterül az egész konjugált lánc mentén, ezért az ilyen állapot „delokalizált” π -állapot.

Lerajzolhatjuk, hogyan változik az elektron *helyzeti energiája* a konjugált szénlánc mentén. A széntörzsek közvetlen közelében valamivel nagyobb a vonzás, mint két széntörzs között, ott tehát valamivel mélyebb a helyzeti energia, mint emitt. Az elektron helyzeti energiáját tehát hullámvonal írja le.

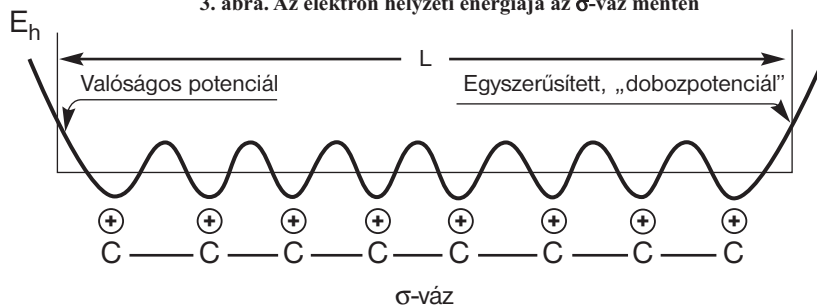
Említettük, hogy a σ -elektronrendszer nagyjából kiegyenlíti a magok vonzását, ezért nem követünk el nagy hibát, ha a helyzeti energia hullámvonalát „kiegyenesítjük”. A konjugált lánc két végén meg úgy rajzoljuk, mintha meredeken menne fölfelé. Ez azt jelenti, hogy a σ -váz mentén az elektron helyzeti energiája végig egyforma, de onnan az elektron nem szabadulhat ki, mert „meredek fal” állja útját. Valószínű, sokan rájöttek már, hogy ez a sima aljú, meredek falú „potenciálleptesi” valójában ugyanaz, mint az „egydimenziós doboz”. (Az egy dimenziót persze nem szabad teljesen szó szerint érteni, hiszen az elektron fölül is van, meg alul is, meg szélességben is van kiterjedése, de a hosszan elnyúlt σ -váz annyira aránytalanul kigyószerű, hogy az egydimenziós doboz egész jó modelljének ígérkezik.) Alkalmazzuk hát a húrmódellet erre az esetre. Miben különbözhetnek egymástól a delokalizált π -állapotok? Csak a mozgási energiában, mert a helyzeti energiát a σ -váz fölött és alatt végig azonosnak és állandónak tekintjük. A „sokféle, de nem akármilyen” elektronállapotot jellemző kvantumszámok tehát csak a mozgási energia értékeire vonatkoznak, ugyanúgy, mint a dobozmódelben...

Most már majdnem célnál vagyunk, de még valami fontos hiányzik. Eddig egyetlen „kóbor” elektrónról beszéltünk, amely valahogyan odatévedt a pozitív töltésű σ -váz erőterébe, s éppen most azt számítottuk ki, milyen lehetséges állapotok állnak rendelkezésére. A „kényelmes” elektron természetesen a lehető legkisebb energiájú, legmélyebb π -állapotot foglalja el. A valószínűségi konjugált polién-molekulában – pl. a paprika színes kapszorubinjának molekulájában – azonban nem egy π -elektron van, hanem annyi, hogy a σ -váz minden töltése semlegesítve legyen, vagyis pontosan annyi, ahány háromligandumos szénatom sorakozik a σ -váz konjugált láncában. Hová kerülnek ezek az elektronok?

2. ábra. A kettős kötések elhagyásával felírt molekula szénláncának részlete; valamennyi atomtörzs egy közös síkban van



3. ábra. Az elektron helyzeti energiája az σ -váz mentén



Természetesen a rendelkezésre álló π -állapotokat töltik meg...

Egyszerűen annyit kellett feltételeznünk, hogy a mikrorendszerek kvantumosságát, vagyis azt a sajátosságát, hogy sokféle, de nem akármilyen állapotban lehetnek, állóhullám-rendszerekkel modellezhetjük. Valójában ezt akartuk bemutatni, a paprika piros színe csak ürügy volt. Azért választottuk éppen ezt a példát, mert a konjugált poliének delokalizált π -elektronállapotai a legegyszerűbb állóhullám-rendszerrel, az „egydimenziós” húr állóhullámaival modellezhetők. A valóság természetesen sokkal bonyolultabb, mint a modell. De a modell mégis valami lényegeset ragad meg a valóságból.

A modell finomítható, akkor a számított adatok pontosabban egyeznek a kísérleti-
leg meghatározottakkal, de természetesen a számítási módszerek is egyre bonyolultabbakká válnak...

A kísérleti tapasztalat azt mutatja, hogy azok az anyagok színesek, amelyekben kiterjedt, delokalizált π -állapotok vannak. Ha az elektronnak kellően nagy térrész áll rendelkezésére, akkor energiáját (elsősorban a mozgását) kis adagokban változtathatja, tehát már a látható fény viszonylag kis energiájú fotonjait is elnyelheti; ezért színes... Az ún. „telített” szénvegyületek molekuláiban, amelyekben csak σ -állapotú elektronok vannak, minden elektron nagyon szűk helyre – két-két mag környezetére – van beszorítva. Ezek „gerjesztéséhez” csak nagy energiájú fotonokkal rendelkező, kis hullámhosszú ultraibolya fény alkalmas. A „láttható” fényből ezek semmit nem nyelnek el, az tehát változatlanul halad át rajtuk vagy verődik vissza róluk. Ezért az ilyen anyagok színtelenek. Színessé csak akkor válik egy anyag, ha molekulájában az elektronnak kellően hosszú „kifutópálya” áll rendelkezésére. Ilyen körülmények között kis adagokban változtathatja energiáját. Ilyen elnyúlt, kiterjedt elektronállapotok csak a konjugált rendszerek delokalizált π -állapotaiban valósulnak meg. Ha a polién elég hosszú, vagyis az L elég nagy, akkor az energiaadag a látható fény valamelyik komponensének energiájára csökken. Ezt elnyeli a molekula, s a „hiányos” maradék fény színesnek látszik.

Végre megadhatjuk a szakszerű választ a címben feltett kérdésre. A paprika azért piros, mert a kapszorubin-molekulában az elektronok egy része hosszú „kifutópályán”, sok szénatomtörzsre kiterjedő, delokalizált π -állapotban van. Az ilyen elektron már a látható fény kis energiájú fotonjának elnyelésével is megváltoztathatja állapotát, átugorhat egy másik delokalizált π -állapotba. *A paprika színességét az anyag állóhullám-modellje alapján értettük meg.* ☀

HORVÁTH OTTÓ – SZABÓNÉ BÁRDOS ERZSÉBET
– FODOR LAJOS

A fotokémia környezetünkben és környezetünkért

Mindazon reakciók a fotokémia tárgykörébe tartoznak, melyek fény hatására mennek végbe. Ezeket a kémiai folyamatokat a látható vagy az ibolyántúli hullámhosszú fotonok elnyelése váltja ki, így – eltérően az úgynevezett termikus reakcióktól, melyek viszonylag nagy hő mint aktiválási energia betáplálását igénylik – enyhe körülmények közt, természetes hőmérsékleten és nyomáson játszódhatnak le. A természetben a napsugárzás hatására végbemenő legismertebb fényhasznosító folyamat a fotoszintézis, melyben a fényenergia nemcsak aktiválásra szolgál, hanem be is épül a reakció fő termékébe, a cukorba. Az így képződő, napenergiát tároló szénhidrátok a bioszféra táplálkozási piramisának alapját képezik. A földi élet fenntartásához e kétségtől legfontosabb fotokémiai (és egyúttal fotobiológiai) folyamat mellett számos, mind az élő szervezetekben, mind élettelen környezetünkben lejátszódó, a napsugárzás által kiváltott reakciót ismerünk, melyek jelentős szerepet játszanak a különböző életfolyamatokban csakúgy, mint egyes elemek biogeokémiai körforgásában, előfordulási formáik megoszlásában és átalakulásában.

A természetben lezajló fotokémiai reakciók mellett számos olyan, mesterségesen létrehozott rendszert ismerünk, melyekben akár mesterséges fényforrással, akár ugyancsak a napsugárzás hasznosításával az ember és környezete számára előnyös folyamatokat idézünk elő. Így például különböző típusú szennyezett vizek, ill. levegő tisztítását segíthetjük elő, speciális anyagok környezetbarát előállítását valósíthatjuk meg – amivel hozzájárulhatunk a zöld kémia térhódításához –, vagy a gyógyításban alkalmazhatunk fotoreakciókon alapuló kezeléseket.

Mindezek jól érzékeltetik, hogy a fény által kiváltott folyamatok kiemelkedő jelentőségűek mind természetes környezetünk, mind önfenntartásunk szempontjából, annál is inkább, mert e kettő elválasztha-

atlanul kapcsolódik egymáshoz. Ebben az áttekintésben szeretnénk azokat a legfontosabb természetes és mesterséges fotokémiai rendszereket bemutatni, melyek tipikus példák gyanánt, egyszersmind bizonyítékul is szolgálnak az előbbieken leírtakhoz.

Fontos alapismeretek

Ahhoz, hogy megértsük a fény hatására lejátszódó kémiai, illetve az azokhoz vezető vagy velük párhuzamosan végbemenő fizikai folyamatokat, szükségünk van néhány általános definíció és törvény ismeretére [1]. Ezek közt a legfontosabb, s egyúttal a legnyilvánvalóbb is, hogy fotokémiai változást csak a fotoaktív részecske által elnyelt foton (fényenergia) okozhat. Vagyis pl. a fény szóródása egy részecskén nem idézheti elő annak kémiai változását. A foton energiájának ($h\nu$, ahol h a Planck-állandó, ν a fény rezgésszáma) kvantált (vagyis egy meghatározott nagyságú csomagként történő) felvételével változik meg az adott fényelnyelő részecske (pl. ion, molekula vagy kristály) elektronsűrűségének eloszlása, így a benne lévő kötések erőssége, iránya. Ennek révén megnő a reakciókészsége mind önmagában végbemenő (unimolekuláris) reakció, mind egy partnerrészecskével megvalósuló (bimolekuláris) folyamat tekintetében. Ezt az egy (vagy több) foton elnyelésével létrejövő állapotot gerjesztett (elektron)állapotnak hívják, szemben a fény abszorpcióját megelőző kiindulási vagy alapállapottal.

A gerjesztett állapotú részecske többféle – mind uni-, mind bimolekuláris – fotofizikai és fotokémiai folyamat révén veszítheti el többletenergiáját. A kémiai reakció eredményeként új, alapállapotban a kiindulási részecskétől összetételben (elektron-számban) és/vagy szerkezetben eltérő anyag képződik. Amely fény által kiváltott kölcsönhatás nem hoz ilyen mértékű változást, az

fotofizikainak minősül. E definíció tükrében a következő, fontosabb fotofizikai és fotokémiai folyamatokat érdemes megemlíteni, melyek a további tárgyalás szempontjából lényegesek:

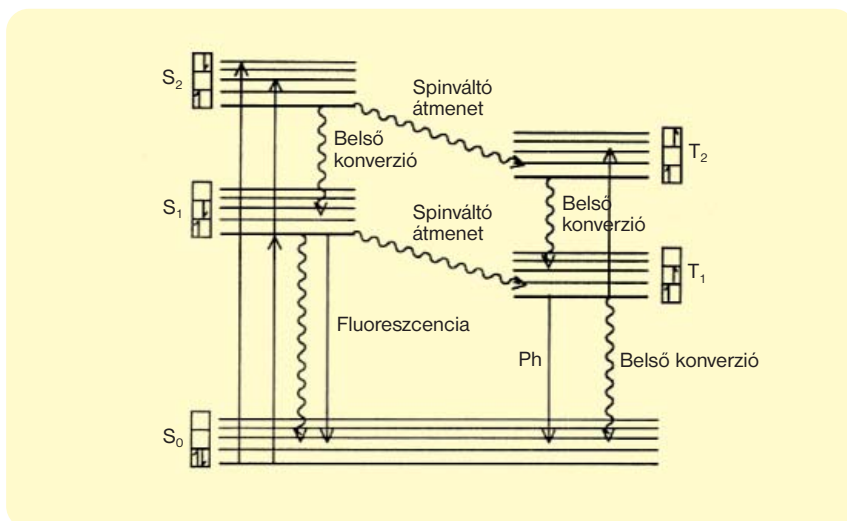
Fotofizikai folyamatok:

- 1) Fotogerjesztés a foton energiájának felvétele, melynek révén a fényelnyelő (általában alapállapotú) részecske gerjesztett (elektron)állapotba kerül (fs-ok alatt).
- 2) A gerjesztési energia leadása fény formájában (emisszió) vagy fénykibocsátás nélkül (belső konverzió) a környezetnek. Ha közben változik a részecske spinállapota, foszforeszcenciáról beszélünk, ami lassabb folyamat (μs-tól órákig tarthat), míg a spinállapot változása nélkül fluoreszcencia játszódik le, mely sokkal gyorsabb (ns-ok vagy annál rövidebb idő alatt).
- 3) A gerjesztési energia átadása egy másik alapállapotú részecskének, hogy ily módon az kerüljön gerjesztett állapotba. Ez az ún. érzékenyítési reakcióknál játszik fontos szerepet, amikor az energiát átvevő részecske nem fotogerjeszthető, mert nem fényelnyelő az adott besugárzási hullámhossz-tartományban, (pl. látható fény).
- 4) A gerjesztett részecske spinállapotának megváltozása. Ebben a folyamatban az általában szingulett spinmultiplicitású állapotról (melyben ugyanannyi a +1/2, mint amennyi a -1/2 spinkvantumszámú elektronok száma, vagyis nincs párosítatlan spinű elektron) triplett állapotra vált, melyben 2 párosítatlan spinű elektron található. A kiválasztási szabályok közül, melyek megszabják, hogy egy fotofizikai folyamat milyen valószínűséggel, vagyis milyen sebességgel megy végbe, a legerősebb a spinállapotra vonatkozó. Eszerint azok a folyamatok kedvezményezettek (gyorsak), melyek során nem változik a részecske spinállapota. Például ezért gyors a fluoreszcencia, ahol szingulett → szingulett átmenet játszódik le, s lassú a foszforeszcencia, ahol triplett → szingulett a jellemző átmenet. Ennek megfelelően a 3. pontban említett érzékenyítéshez hosszú élet-tartamú triplett gerjesztett állapotú részecskére van szükség, hogy a többlet-energiáját átvevő, alapállapotú részecskének legyen ideje találkozni vele, mielőtt más úton el nem veszti a gerjesztési energiáját.

A fenti folyamatok szemléletesen ún. módosított Jablonski-diagrammal ábrázolhatók (**1. ábra**), melyen a folytonos vonalak a fényelnyeléssel vagy -kibocsátással járó folyamatokat jelölik.

Fotokémiai folyamatok:

- 1) Fotoizomerizáció: amikor a molekula vagy ion összetétele, oxidációs állapota nem, de kötősszerkezete megváltozik.



1. ábra. Módosított Jablonski-diagram

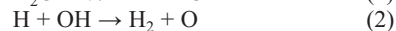
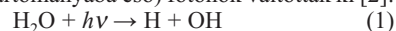
- 2) Fotodisszociáció: amikor egy részecske kettő vagy több részre esik szét. Speciális esete a fotoionizáció, ami elektronkibocsátást jelent (nem feltétlenül semleges molekulából). E folyamat már a következő lehetőséghez is társul.
- 3) Fotoredoxi reakció: amikor a gerjesztett állapotú részecske elektront ad át az alapállapotú partnernek (oxidáció) vagy vesz át tőle (redukció). Gyakran a fotoredoxi reakció disszociációval együtt megy végbe, amikor az elektronátmenet a gerjesztett részecskén, általában egy komplex vegyületen belül játszódik le, pl. a ligandumról a központi fémionra (vagy viszont), s a megváltozott oxidációs állapotú alkotó részek már nem kapcsolódnak egymáshoz.

A következőkben abban a sorrendben igyekezzünk áttekinteni a természetben lejátszódó fontosabb fotokémiai reakciókat, ahogy azok térben előfordulnak – kezdve attól, hogy a napsugárzás belép a magasabb légköri rétegekbe (esetünkben alapvetően a sztratoszférába), folytatva a troposzférával, ahol mi is élünk, majd ehhez kapcsolódva a felszíni vizekkel és a bioszférával zárva a sort.

Fotokémiai reakciók az atmoszférában

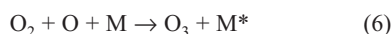
E cikk keretében csak a 100 nm-nél nagyobb hullámhosszúságú ibolyántúli és a látható fény által előidézett reakciókkal foglalkozunk, mert az említett térbeli (magassági) tartományokban az ezek által kiváltott reakciók számottevők. Minél rövidebb a légkörünkbe belépő foton hullámhossza (vagyis minél nagyobb az energiája), annál nagyobb az esélye arra, hogy egy részecske elnyelje, s ezáltal valamilyen kémiai reakció játszódjon le. A Föld történetének első

2 milliárd éves szakaszában az atmoszféra O₂-tartalma elhanyagolható volt, mivel az oxigént fogyasztó reakciók gyorsabbak voltak a termelőknél. Ennek megfelelően a légkör redukáló sajátosságú volt, s a kezdeti élőlények is ehhez alkalmazkodtak, így számukra az oxigén mérgező volt. E periódust követően lassan növekvő koncentrációval az elemi oxigén is megjelent a légkört alkotó molekulák közt, s ez elsősorban a vízmolekulák disszociációs reakciójának következménye volt, melyet a 190 nm-nél rövidebb hullámhosszú (vagyis a vákuum UV-tartományába eső) fotonok váltottak ki [2]:



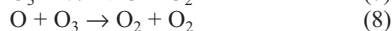
Így mintegy félmilliárd év alatt a légkör oxigéntartalma elérte a jelenlegi érték (21 térfogat%) ezredrészét. Ez az ún. Urey-szint [3]. A lassan kifejlődő és egyre nagyobb életeret nyelő fotoszintetizáló élőlények oxigéntermelésének hatására a légkör O₂-koncentrációja eleinte lassabban kezdett növekedni; több mint félmilliárd év alatt érte el a jelenlegi érték századrészét – ez a Pasteur-szint –, majd a rákövetkező félmilliárd év során egyre gyorsuló, autokatalitikus folyamatnak megfelelő ütemben elérte a jelenlegi szint kb. kétharmad részét. Ez a fokozatosan kialakuló és vastagodó ózonrétegnek volt köszönhető, mely az élőlényekre káros ibolyántúli sugárzás egyre hatékonyabb kiszűrésével lehetővé tette, hogy a fotoszintézis már ne csak a felszíni vizeket, hanem a szárazföld egyre nagyobb területeit is meghódítsa. Az ózonréteg a sztratoszférában (30 km felett) kezdett kialakulni a 243 nm-nél rövidebb hullámhosszú UV sugárzás hatására, mely a dioxi- gen molekula disszociációját eredményezte:



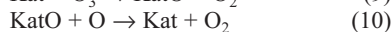
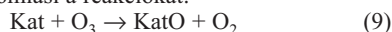


Az M részecske jelenléte azért szükséges, mert az veszi fel az exoterm reakció során felszabaduló energiát, mely különben az ózont gerjesztené, s így azonnali bomlását okozná.

Az így kialakult ózonréteg szűrő hatása különösen a 300 nm alatti tartományban érvényesül, ahogy ez az elnyelési színeképéből is jól látható (2. ábra). Ennek megfelelően az atmoszférába belépő napsugárzásból a Föld felszínét már csak 290 nm-nél nagyobb hullámhosszú fotonok érik el (3. ábra). Az ózonmolekula az ibolyántúli fény elnyelése következtében elbomlik (disszociál):



Így egy foton elnyelése 2 molekula ózon bomlását idézi elő akkor, ha a fotokémiai reakcióban (7) keletkező termékek (O és O₂) alapállapotúak, ami látható fénnel történő gerjesztés esetén jellemző. Ibolyántúli fotonok hatására ez az ún. kvantumhasznosítási tényező elérheti a 4-et (a Huggins-sávok tartományában, 320-360 nm), nagyobb energiájú fény (a Hartley-sávok tartományában akár a 6-ot is, mert a fotodisszociáció termékei gerjesztett állapotúak lesznek, így további bomlási reakciókat indukálnak. Az ózonmolekulák fotokémiai képződését és fényelnyelés révén lejátszódó visszaalakulását dioxigénné Chapman-ciklusnak nevezzük. Amikor a légkörkutatók meg tudták mérni az ózonréteg koncentráció-profilját, kiderült, hogy a Chapman-cikluson alapuló (a napsugárzás színeképét és intenzitását, valamint a dioxigén koncentrációját figyelembe vevő) elméleti számítások eredményeinél jóval kisebbek a valós ózonkoncentrációk, ami arra utalt, hogy más reakciók is hozzájárulnak az ózon bomlásához. Későbbi kutatások kiderítették, hogy párosítatlan elektronnal rendelkező szabad gyökök katalizálják ezeket a bomlási reakciókat:

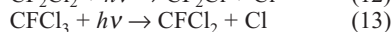


(Kat = pl. NO, Cl, H₂O)

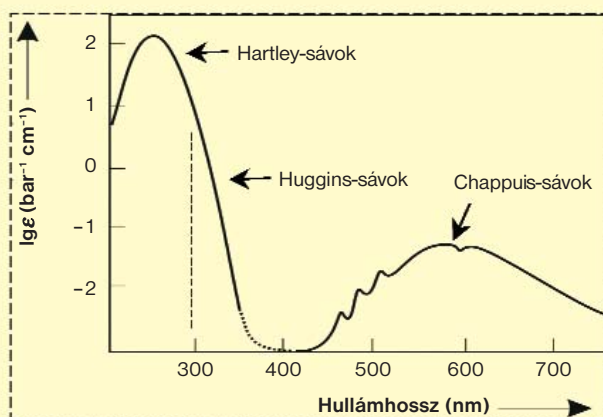
Így a bruttó folyamat:



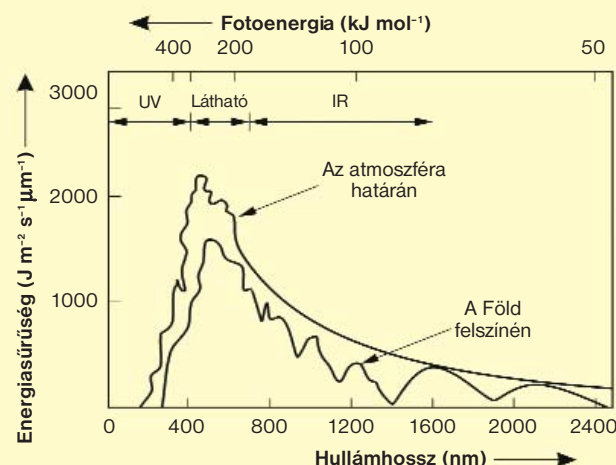
Emiatt tiltották be a freonok (CCl₃F és CCl₂F₂) használatát, melyeket elterjedten alkalmaztak hűtőközegként pl. klímaberendezésekben vagy hajtógázként különböző aeroszolos dobozokban, üvegekben. Ugyanis e stabil és illékony vegyületek átalakulás nélkül feljutottak a sztratoszférába, ahol nagyenergiájú UV sugárzás hatására disszociációt szenvedtek:



Az így képződő klóratomok (gyökök) azután egyenként akár több millió ózonmolekula bomlását is kiválthatják katalízis révén, mire valamilyen rekombinációs folyamatban ártalmatlanná válnak.



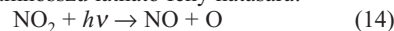
2. ábra. Az ózon elnyelési színeképe



3. ábra. A napsugárzás színeképe az atmoszféra határán és a Föld felszínén

Míg a sztratoszférában képződő ózon UV sugárzást szűrő hatása révén nagyon hasznos az egész bioszféra számára, addig a troposzférában, ahol közvetlenül belélegezve káros oxidációs reakciókat okoz, kifejezetten veszélyes is lehet. Így például a fotokémiai füstködben is, melyben több irritáló komponens mellett ózon is felhalmozódik mégpedig, ahogy az elnevezés is utal rá, fotoreakció következtében. Az ilyen füstköd kialakulásának feltétele az erős napsugárzás, valamint a nitrogén-dioxid és a szénhidrogének viszonylag nagy koncentrációja a levegőben, ami sűrű gépjárműforgalom esetén valószinű. E feltételek először a napfényes Kalifornia egyik nagyvárosában teremtődtek meg, ezért ez a jelenség Los Angeles-típusú füstköd néven is ismert. A képződését indító fotokémiai reakció a vöröses-barna nitrogén-dioxid disszociációja a

földfelszín elért közeli UV és kisebb hullámhosszú látható fény hatására:

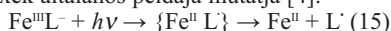


Az így képződő oxigénatom alapállapotú dioxigén molekulával ózont alkot (6). Ezzel párhuzamosan a fotodisszociáció másik terméke, a NO, a szénhidrogénekből fejlődő peroxo-származékok által visszaoxidálódik NO₂-dá megakadályozva reakcióját az ózonnal, mely így felhalmozódik.

Fotokémiai reakciók a felszíni vizekben és a bioszférában

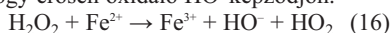
Az abiotikus fotokémiai reakciók a hidroszférában a felszíni vizek felső rétegeiben mennek végbe, melyekbe még kellő intenzitással be tud hatolni a látható és UV napsugárzás. Itt elsősorban több stabil oxidá-

ciós állapotú átmenetifémek koordinációs vegyületeinek, ill. kolloidot képező oxid-jainak fotoreakciói érdemelnek említést. A fémkomplexek esetében az alapismertekben már említett, ligandumról a központi fémre irányuló töltés- (vagyis elektron-) átvitel (LMCT) játszódik le, melyet diszszociáció követ, ahogy ezt a vas(III)-komplexek általános példája mutatja [4]:



Az $\text{L}^{\cdot-}$ ligandum szerepét számos, a természetben gyakran előforduló szerves vagy szervetlen anion játszhatja, pl. citrát, oxalát vagy klorid, hidroxid. A szerves ligandumok esetében a képződő reakcióképes $\text{L}^{\cdot-}$ gyök gyakran egy további redukciót idéz elő egy másik vas(III)-komplexszel (ha annak elég nagy a koncentrációja), megduplázva az elsődleges fotokémiai reakció hatékonyságát. Azonban a természetben a komplexek kis koncentrációja következtében a redukáló $\text{L}^{\cdot-}$ gyök dioxidigénnel reagál, így szuperoxid gyökionon ($\text{O}_2^{\cdot-}$) és szerves peroxilgyök ($\text{RO}_2^{\cdot-}$) képződik. Előbbi diszproporcionálódási reakciójában oxigén és H_2O_2 keletkezik. Nagyobb méretű szerves ligandumok, pl. huminsavak vagy fulvosavak anionjai is gyakran vesznek részt ilyen reakciókban, s így befolyásolják a vas és hasonló koordinációs és fotoredoxi tulajdonságú fém biogeokémiai körforgását.

A szervetlen ligandumoknál viszont a gyökök erősen oxidáló sajátosságuk. Így pl. hidroxilgyök ($\text{HO}^{\cdot}$), mely a közeli UV tartományban gerjeszthető FeOH^+ fotoreakciójában képződhet, olyan erős oxidáló potenciálú (1,7–1,9 V), hogy hatékonyan átalakítja, lebontja a közelében található szerves anyagokat. Az elsődleges fotokémiai reakcióban (15) képződő vas(II) képes a hidrogén-peroxid bomlását elősegíteni úgy, hogy erősen oxidáló $\text{HO}^{\cdot}$ képződjön.

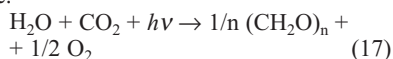


Ezt Fenton-reakciónak hívják. Amennyiben a Fe^{2+} fotokémiai úton képződik, akkor foto-Fenton-reakcióról beszélünk. Ezt mesterségesen előidézve víztisztításban hasznosítják a $\text{HO}^{\cdot}$ erősen oxidáló tulajdonsága miatt.

Tengervízben nagy koncentrációban található kloridionok is képeznek komplex vegyületet Fe^{3+} -mal és más fémionokkal, pl. Cu^{2+} -vel. Ezekben a koordinációs vegyületekben is UV sugárzás hatására LMC folyamat játszódik le, aminek eredményeképp a fémion redukálódik, míg a ligandum oxidálódik klóratommá. Kolloid mangán(IV)-dioxid és vas(III)-oxid esetében a szerves elektrondonorok a részecskékre adszorbeálódva felületi komplexeket alkotnak, s így vesznek részt fotoindukált LMCT reakcióban, melyet már látható fény is kiválthat. Az így képződő Fe^{2+} és Mn^{2+} már vízben oldódnak, ugyancsak jó például szolgálva a fotoredoxi reakciók szerepére a fémek biogeokémiai körforgásában.

Az előbbieken olyan fotoredoxi reak-

ciókra láttunk példákat, melyek nem élő természetes rendszerekben mennek végbe napfény hatására. Ahogy a bevezetésben már említettük, a fotoszintézis a legnagyobb jelentőségű természetes fotoredoxi folyamata, mely élő szervezetekben játszódik le [5]. A jól ismert bruttó reakcióegyenlet (17) által összefoglalt kémiai változás mögött számos részlepcs, köztük nem egy speciális biológiai, biokémiai járul hozzá a víz és széndioxid átalakulásához cukorra és oxigénre.



Egy mólnyi CO_2 redukciójához a folyamatban 470 kJ energiának kell beépülni a fotoszintézis termékeibe. Ez nagyjából két mólnyi 500 nm-es foton energiájának felel meg. Mivel azonban a teljes fotoindukált folyamatra nézve a kvantumhasznosítási tényező egynek kb. tizede, így mintegy 20 mólnyi (ilyen hullámhosszú) foton szükséges egy mól CO_2 redukciójához. A teljes folyamat fotokémiai vonatkozásához annyit érdemes tudni, hogy a fotonokat kb. 300 klorofillmolekulából álló antennarendszerek nyelik el, melyekben bármelyik molekula gerjesztődik is közvetlenül, az ún. rezonancia-transzfer révén átadja egy szomszédjának egészen addig, míg az a molekula körül gerjesztett állapotba, mely már elektront továbbít a biokémiai lépések megvalósításához. Az elektron végülis víz oxidációja révén kerül vissza az antennára, miközben O_2 képződik. A zöld növényekben két fényelnyelő (és -hasznosító) festékkrendszer van, a PS_{680} és a PS_{700} , melyek nevében a szám arra utal, maximálisan milyen hullámhosszú lehet (nm-ben) az a foton, amely elnyelésére még képes. Fontos megjegyezni, hogy a klorofillmolekulákon kívül, melyek a bioszférában számos helyen kiemelt fontosságú szerepet játszó porfirin-származékokhoz tartoznak, a látható fény más hullámhossz-tartományában abszorbeáló, kiegészítő festékmolekulák (pl. karotinszármazékok) is találhatóak, hogy minél nagyobb legyen a rendszer fényelnyelésének hatékonysága. (Amikor ősszel elszáradnak a levelek, előbb a zöld színű klorofillek kezdenek bomlani, s láthatóvá válik a kiegészítő pigmentek sárgás-piros színe.) A fotoindukált lépések sorrendjét tekintve előbb a nagyobb energiájú fotont igénylő PS_{680} gerjesztése szükséges, mely így elektront továbbít – több közvetítőn keresztül – a PS_{700} -hoz, mely további foton elnyelésével növeli annak reakciókészségét, s így – ugyancsak több közvetítő lépésen keresztül – egy nikotinamid-adenin-dinukleotid-foszfat iont (NADP^+) redukál. Az így keletkező NADPH molekulák elektrondonorként szolgálnak a CO_2 már sötétben is végbemenő redukciós lépéseihez, melyekhez az energiát a PS_{680} -tól a PS_{700} -hoz vezető úton az elektron által leadott energia révén képződő adenosin-trifoszfat (ATP)

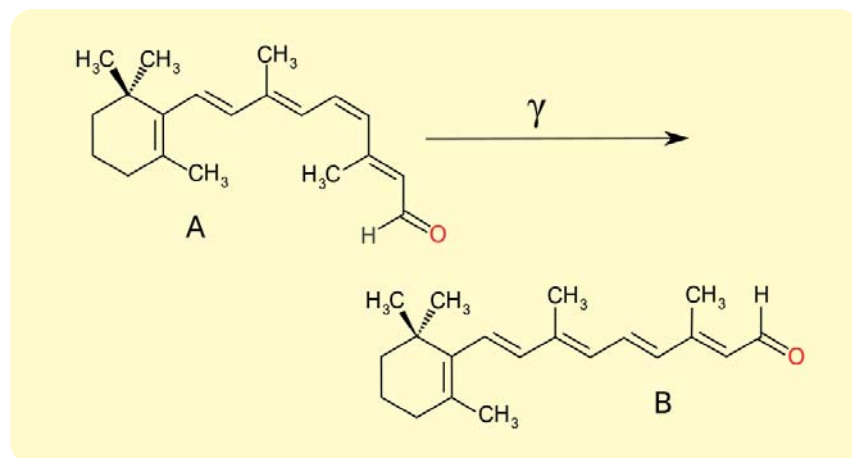
biztosítja. Kimutatták, hogy a zöld növények a 700 nm-es fény hasznosítására képtelenek 680 nm vagy rövidebb hullámhosszú fotonok elnyelése nélkül.

A fotoindukált redoxifolyamatok mellett a bioszférában fontos szerepet játszanak az izomerizációs reakciók is. Ezek közül kiemelkedik a látás (fényérzékelés) alapját biztosító folyamat, illetve érdemes megemlíteni a bőr egy védekező mechanizmusát is, mely a káros UV sugárzás energiájának ártalmatlanítását szolgálja.

Az emberi szem fényérzékelő pálcikáiban, de az alacsonyabb rendű élőlények (pl. békák) szemében is a látható fény hatása a retinal nevű vegyület 11-cisz izomerje – az opszin nevű fehérjetípushoz kötődését követően, mely révén a látóbíbor nevű vegyület jön létre – teljes transz izomerre alakul át (4. ábra), mely hosszú, lineáris alakja következtében szterikus okoknál fogva sem képes tovább kötődni a fehérjéhez. Így deprotonálódási és hidrolízis reakciók segítségével a teljesen transz-retinal elválk a fehérjétől, melynek eredményeként egy elektromos impulzus jut a látóidegen keresztül az agyba. Ezt követően az önállóvá vált vegyület egy, a retinal izomeráz enzim révén katalizált reakcióban visszaalakul a 11-cisz izomerre, s újból indul a ciklus. Mivel a regenerálódási folyamat nem pillanatszerű, hirtelen erős fény átmeneti vaktságot okoz, ha az összes látóbíbor molekulát gerjeszti. A színérzékelést a 11-cisz-retinal különböző fehérjékhez kötődése eredményezi, mert az így képződő látóbíbor molekulák a látható fény más-más hullámhossz-tartományában abszorbeálóak.

A bőr egyik, akár a DNS károsodását is előidéző UV fény elleni védekező mechanizmusában – a legismertebb, melaninképző folyamat mellett – a hámrétegben a hisztidin deaminálásával létrejövő transz-urokán sav fotogerjesztés hatására cisz-formává alakul át. Ezt követően termikus (fényt nem igénylő) folyamatban visszaalakul transz-izomerre, hogy újabb UV fotont tegyen ártalmatlanná. Az ilyen viselkedést hívják *fotokromizmusnak*, s mesterséges rendszerekben is gyakran kihasználják, pl. az erősebb fényre sötétedő napszemüvegek vagy ablakok esetében. Az ember alkotta megoldások esetében azonban inkább fotoredoxi változásokat hasznosítanak, melyek termékei szilárd fázisban (üvegben) rögzítve egymás mellett maradnak, így a gerjesztés megszűnésével képesek visszaalakulni a kiindulási vegyületekké.

A fénynek az emberi szervezet működésében játszott szerepei közt említést érdemel néhány, a napfény túl kicsi intenzitásához vagy épp a fényérzékenységhöz kapcsolódó betegség. Az angolkór esetében a 7-dehidrokoleszterol D_3 vitaminná alakulásához szükséges UV sugárzás elégtelen erőssége folytán a szervezetben túl kevés képződik ebből a vegyületből, mely a kal-



4. ábra. A 11-cis-retinal (A) fotoizomerizációja teljes transz formává (B)

cium csontokba épülését segíti. Így utóbbiak – lévén nem elég erősek – könnyebben görbülnek, ami a csontváz torzulásaihoz vezet. Ez kezdetben az ipari forradalom következtében füstködökkel sújtott Angliában jelentkezett, majd később, a bevándorlások révén a napsütésben szegényebb skandináv országokban a színesbőrűek körében. A D vitamin mesterséges előállításával már megelőzhető.

A porfiria nevű betegség egyik típusánál túl sok protoporfirin van az emberi szervezetben, miután az ahhoz szükséges enzim, mely a vas(II)iont beépíti, hogy hemoglobint képződjön, nem elegendő. Ennek következtében olyan tünetek jellemzik a beteget, melyek a vámpírhistóriák főszereplőinél szoktak előfordulni, így gyaníthatóan sokszor ebben a kórban szenvedőket gyanúsították meg alaptalanul. Amellett, hogy a páciensek vérszegények, s emiatt sápadtak, két fénnel kapcsolatos jelenség is kapcsolódik e betegséghez; mindkettő fotofizikai. A fényérzékenység abból ered, hogy a szabad porfirin a bőrfelszín közelébe jutva már a látható fény hatására is szingulett gerjesztett állapotba kerül, melyből nagy hatékonysággal hosszú élettartamú triplett alakul át. Ez könnyen átadja energiáját a sejtmembránokban oldott O_2 molekulának, mely így szingulett gerjesztett állapotú lesz. Mivel az O_2 alapállapotban triplett, szingulettként elég hosszú élettartamú ahhoz, hogy megnövekedett oxidáló potenciálja révén megtámadja és elroncsolja a közelébe kerülő szerves sejtalkotó molekulákat. E pusztítás következtében a leégéshez hasonló bőrgyulladást idéz elő. Ez ellen karotin fogyasztásával lehet védekezni, mely átveszi a porfirin gerjesztési energiáját, és hővé alakítva ártalmatlanítja azt. A másik jelenség a fogak fluoreszkálása. Mivel látható fény hatására a szabad porfirinek hatékony emissziót mutatnak, a beteg fogai, melyekbe ugyancsak beépül a porfirin, zöldes fénnel fluoreszkálnak. A szingulett oxigén képző-

dését előidéző fotoérzékenyítést a gyógyszerészetben is kihasználják daganatos sejtek pusztítására. Ekkor a fényérzékenyítő porfirinek kívülről juttatják a szervezetbe, s a rákos sejtek közelébe vezetett száloptikán át gerjesztik őket. Ezt az eljárást fotodinamikus vagy -dinamikus terápiának hívják.

Mesterséges rendszerek – kitekintés

Bár a fotokromizmus és az érzékenyítés kapcsán már említésre került egypár mesterséges – mind napfénnel, mind ember által kotta fényforrással működő – rendszer, néhányat még érdemes megemlíteni, melyek elsősorban a napsugárzás mint megújuló tiszta energia átalakítását és tárolását, ill. az antropogén környezetszennyező anyagok lebontását segítik elő. Előbbiek esetében a közvetlen elektromossággá alakítás mellett, melyet leggyakrabban szilárd fázisú nap-elemekkel és ún. regeneratív fotoelektrokémiai cellákkal (vagy Grätzel-cellákkal) érnek el, a víz bontása a cél (levegőmentesített körülmények közt), hogy hidrogént mint környezetbarát üzemanyagot nyerjenek. Ehhez olyan fotokatalizátorokat alkalmaznak, melyek gerjesztett állapotban képesek a víz hidrogénjének redukálására és oxigénjének oxidálására. Ez általában direkt módon nem működik, hanem töltésközvetítő katalizátorokra is szükség van. Ilyen rendszerekben fotokatalizátorként közeli UV és látható fénnel gerjeszthető fémkomplexekeket (pl. -porfirinek [6]) vagy nanoméretű félvezetőket alkalmaznak. A koordinációs vegyületek esetén gerjesztett állapotban egy elektron magasabb energiaszintre kerül, s egyidejűleg a helyén üressé válik egy kisebb energiaszintű pálya. Így könnyebben tud redukálni az energiagazdagabb elektronjával, s elektront fogadni (oxidálni) kisebb energiaszintre, mint alapállapotban. A félvezetőknél a gerjesztés hasonló

változást idéz elő; a tiltott sávnál nagyobb energiájú foton elnyelése a kisebb energiájú vegyértéksávból egy elektront (e^-) juttat a vezetési sávba, miközben az előbbiben egy pozitív töltésű lyukat (h^+) hagy. Amint az így képződött (e^-h^+) pár tagjai diffúzióval eléri a félvezető részecske felszínét, ott – térben elkülönülve – elektrokémiai reakcióban katódként redukálni (e^-) és anódként oxidálni (h^+) képesek a felülethez adszorbeálódó elektrondonorokat és -akceptorokat, amelyek alapállapotban egymással nem reagálnak. Vízbontás esetén a katódreakció eredményeként képződő hidrogén a céltermék. E nanoméretű félvezetőket szennyezőanyagok lebontására is alkalmazzák. Ezekben az esetekben több reakciót is ezt a célt szolgálja. A felületre adszorbeálódott szennyezést a lyuk oxidálja, de elektron általi redukciója is eredményezheti bomlását. Levegővel telített vizes rendszerek esetében a víz oxidációjával HO^+ gyök, míg az oldott O_2 redukciójával O_2^- képződik – mindkettő erőteljes oxidáló sajátosság, így a nem adszorbeálódott (vagyis az oldatfázisban lévő) szennyezőanyagot is elbontja [7]. Hasonló elven működő levegőtisztítás esetén a vizet a levegő megkötődő páratartalma szolgáltatja.

Mindezek a példák jól mutatják, hogy a természetben végbemenő fotokémiai reakciók megismerése mellett azok hasznosításával és új, mesterséges rendszerek kialakításával az ember egyre hatékonyabban képes a napsugárzás energiáját természetbarát módon átalakítani és tárolni, valamint – mesterséges fényforrásokkal együtt – környezetvédelmi, víz- és levegőtisztító eljárásokban hasznosítani. Ezeknek a módszereknek – a fokozatosan kimerülő fosszilis tüzelőanyagok kiváltása mellett – különösen az elektromos, víz- és csatorna-hálózattól távol eső területek ellátásában van egyre növekvő jelentősége.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Dr. Papp Sándornak és Dr. Valicsek Zsoltnak a kézirat elkészítéséhez nyújtott hasznos tanácsaikért.

Irodalom

- [1] R. P. Wayne: Principles and Applications of Photochemistry, University Press, Oxford, 1988.
- [2] R. P. Wayne: Chemistry of Atmospheres, Oxford University Press, Oxford, 1994
- [3] Papp S., R. Kümmel: Környezeti kémia, Tankönyvkiadó, Bp. 1992
- [4] G.R. Helz, R.G. Zepp, D.G. Crosby (eds.): Aquatic and Surface Photochemistry, Lewis, Boca Raton, 1994
- [5] J. D. Coyle, R. R. Hill and D. R. Roberts (eds.): Light, chemical change and life: a source book in photochemistry, The Open University Press, Walton Hall, 1982
- [6] O. Horváth, Zs. Valicsek, G. Harrach, G. Lendvay, M. A. Fodor "Spectroscopic and photochemical properties of water-soluble metalloporphyrins of distorted structure" Coord. Chem. Rev. 2012, 256, 1531–1545.
- [7] E. Szabó-Bárdos, O. Markovics, O. Horváth, N. Törő, G. Kiss "Photocatalytic Degradation of Benzenesulfonate on Colloidal Titanium Dioxide" Water Res. 2011, 45, 1617–1628.

LENTE GÁBOR

„... és lőn világosság”

Fényt kibocsátó kémiai reakciók a világító rudaktól a szentjánosbogarakig

Meglehetősen ritka dolog, hogy kémiai reakció közvetlen eredményeként fény is keletkezzen. Az égések ugyan gyakoriak, és gyertyalángként évezredek óta világításra is használják őket, azonban ezekben a fény keletkezése inkább kapcsolatban van a magas hőmérséklettel és az ezzel kapcsolatos másodlagos folyamatokkal. Egy megfelelő mennyiségű levegővel szabályozott gázláng majdnem szintelen (de persze közben forró, ezért gyakran balesetveszélyes is). A lángokban a fényt okozó jelenségeket a legtöbb esetben pusztán a hőmérséklet növelésével, a lángokban zajló kémiai reakcióktól függetlenül is létre lehet hozni.

Azt a jelenséget, amely során kémiai folyamatban keletkezik fény, *kemilumineszcenciának* nevezik, hogy más mechanizmusú fényképződésektől megkülönböztessék. Egy ilyen kísérletre az **1. ábra** mutat be példát: a lombik tartalma kemilumineszcencia miatt világít kékes színnel, de közben egyáltalán nem melegszik a környezet hőmérséklete fölül.

A látható fény egy fotonjának energiája olyan tartományba esik, amelyik a kémiai kö-

tési energiák és általában a kémiai reakciókkal járó energiaváltozásokéval azonos. Emiatt a fény gyakran hatással van a kémiai reakciókra, az ilyen kölcsönhatások tanulmányozásával a fotokémia foglalkozik. Ez viszont legtöbbször egyirányú: a fény ugyan gyakran okoz kémiai reakciókat (ilyen például a zöld növényekben lejátszódó fotoszintézis), de a folyamat fordítottját, tehát a kemilumineszcenciát bizony igen nagy utánajárással, és persze a legtöbb esetben sötétben kell keresni, mert ha elő is fordul, a kibocsátott fény intenzitása általában eltörlődik még egy felhős téli nap fényereje mellett is.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a lumineszcenciának többféle változata is ismert a kemilumineszcencián kívül. Talán a leggyakoribb a megvilágítás hatására történő fénykibocsátás, amelyet lehetne szabatosan fotolumineszcenciának is nevezni, de ez a kifejezés nem igazán terjedt el a tudományban. Ez elsőre akár még magától értetődőnek is hangozhat, hiszen az anyagok legtöbbször visszaveri a ráeső fényt; a fotolumineszcencia esetében azonban nem erről van szó: maga az anyag bocsátja ki az új fotonokat. Ezt az egyszerű fényvisszaverődéstől többféleképpen is meg lehet különböztetni; a legegyszerűbb olyan irányban vizsgálni egy anyag fotonkibocsátását, amerre eleve nem verheti vissza a ráeső fényt. A fotolumineszcencián belül fluoreszcenciának nevezik azt az egyébként meglepően gyakori jelenséget, amikor egy anyag addig bocsát ki maga is fényt, amíg a megvilágítás tart. Ha az anyag a beeső fény megszűnése után is világít még egy ideig (általában csak a másodperc egy tört részéig, de kivételes esetben akár percekig is), akkor a jelenséget foszforeszcenciának hívják. Létezik még az úgynevezett tribolumineszcencia, ahol a fénykibocsátást mechanikai behatás okozza; erre viszonylag látványos, az interneten is sok videón megtalálható például az a kísérlet, amelyben teljes sötétben koc-

kacukrok összetörésekor kék felvillanásokat lehet látni. Az elektrolumineszcencia sem ismeretlen jelenség; ilyenkor a fénykibocsátást elektromos áram vagy erős elektromos tér hozza létre.

Minden lumineszcencia-jelenségben közös, hogy egyes molekulák úgynevezett gerjesztett állapotba kerülnek: ez többnyire azt jelenti, hogy a molekulában lévő elektronok közül néhány többletenergiára tesz szert valami módon, és a kötések ugyan még nem hasadnak fel, de megváltoznak, gyengébbé válnak. Az ilyen gerjesztett állapotokból a legstabilabb állapotba jutás közben az energiafelesleg egy foton, vagyis fény formájában távozik. Persze nem ez a fénykibocsátás egyetlen lehetséges módja: a leghagyományosabb villanyégőkben az izzószál azért világít, mert minden meleg test elektromágneses sugárzást bocsát ki, s az izzószál hőmérsékletén ennek egy része a látható fény tartományába esik. Ebből persze azt is ki lehet találni, hogy a hagyományos izzók hatékonysága igen kicsi: először is energia kell az izzószál felmelegítéséhez, majd a magas hőmérséklet fenntartásához, s a kibocsátott sugárzásnak is csak viszonylag csekély része esik a szemmel látható tartományba. Ezért a lumineszcencián alapuló fényforrások (pl. a fluoreszcenciát használó fénycsövek vagy az elektrolumineszcencián alapuló LED-ek) sokkal hatékonyabb világító eszközök, mint a hagyományos izzók, s így a régi izzókat az Európai Unió szabályok szerint fokozatosan ki is kell vonni a forgalomból.

A lumineszcencia már felsorolt különböző fajtái között az az elvi különbség, hogy a molekulák hogyan jutnak gerjesztett állapotba. A kemilumineszcencia esetében kémiai reakció, vagyis kötések átrendeződése zajlik le, s a folyamatban felszabaduló energia (vagy annak egy része) hozza gerjesztett állapotba a molekulát. Ez meglehetősen ritka dolog: a kémiai reakciókban az energiafeleslegtől való megszabadulásnak sok-

1. ábra. A luminol kemilumineszcenciája lombikkísérletben



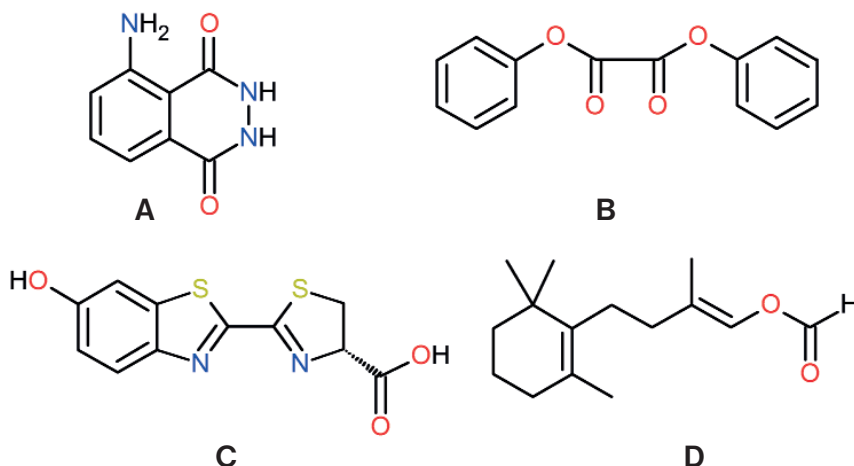
kal valószínűbb módja a molekulák mozgási sebességének növelése, azaz a hőmérséklet emelkedése. Ezért a kemilumineszcenciás reakciók ritkák és akár kivételesnek sem túlzás nevezni őket.

A legismertebb, és látványos kísérletek között is gyakran bemutatott, fénykibocsátással járó vegyi folyamatban a luminol nevű vegyület játssza a főszerepet. Ennek a szerkezeti képletét mutatja be a **2. ábra** (A-molekula). A luminol híg és gyengén lúgos kémhatású (például kevés nátrium-hidroxiddal összekevert) vizes oldatát hidrogénperoxiddal (H_2O_2) reagáltatva nagyon kis mennyiségű katalizátor hozzáadására beindul a fénykibocsátás. A katalizátor többféle anyag is lehet, az egyik legegyszerűbb lehetőség a hipóként ismert háztartási tisztítószer hígított oldatát használni.

A luminol laboratóriumban könnyen előállítható, s ezért viszonylag olcsón megvásárolható anyag. E sorok írásakor egy kilogrammot mintegy 3,5 millió forintért árulnak. Ez első látásra mindennek tűnhet, csak olcsónak nem, de azt is figyelembe kell venni, hogy luminolból egy kilogramm hatalmas mennyiségnek számít: az **1. ábrán** látható, viszonylag nagyobb térfogatú lombikban bemutatott kísérlet elvégzéséhez egy gramm tizedrésze is bőven elegendő.

A luminol fénykibocsátási sajátosságai akár valamelyik Helyszínelők tévé sorozatból is ismerősek lehetnek a nagyközönség számára, hiszen ezen alapul a vérfoltok azonosításának egy igen jól bevált módszere. 1928-ban *H. O. Albrecht* német kémikus fedezte fel, hogy a vér erősítő hatással van a luminol fénykibocsátására. Egy szűk évtizeddel később az is világossá vált, hogy ezért a hatásért a vérben lévő számtalan különböző anyag közül a vasat is tartalmazó hematin a felelős. A módszer több okból is különösen alkalmas a bűnügyi vizsgálatokra. Igen gyorsan, a helyszínen végrehajtható, nem szükségesek hozzá laboratóriumi eszközök. A beszáradt vagy alvadt vérben több a hematin, mint a frissben, ezért ezek kimutatása igen kicsi mennyiségben is lehetséges, így akár egy alaposabb tisztítást követően is kimutathatók a vérfoltok maradványai. Ráadásul a hematin nem bomlik el a reakció közben, hanem klasszikus katalizátorszerepet játszik, így a teszt akár többször

3. ábra. Egy mosdókagyló luminoltesztje az igazságügyi szakértők gyakorlatában



2. ábra. Kemilumineszcenciát mutató molekulák szerkezeti képlete: A: luminol ($C_8H_7N_3O_2$); B: difenil-oxalát ($C_{14}H_{10}O_4$); C: a szentjánosbogárban megtalálható luciferin ($C_{11}H_8N_2O_3S_2$); D: a *Latia*-fajokban megtalálható luciferin ($C_{15}H_{24}O_2$)

is megismételhető; azaz bármiféle kétség elosztható a vizsgálatok újbóli elvégzésével, esetleg gondosabban szabályozott vagy megváltoztatott körülmények között is.

Maga a teszt a legegyszerűbben úgy végezhető el, hogy a gyanús foltra a vizsgálatot végző a luminol és az oxidálószer oldatának keverékét permetezi. A fénykibocsátás mintegy fél percig tart, persze a szá-

bad szemmel való észleléshez viszonylag sötét helyen kell lenni. Erre a módszerre mutat be egy példát a **3. ábra**. Ahogy a képen láthatjuk, a fénykibocsátást megfelelő technika alkalmazásával akár le is lehet fényképezni, így dokumentálható a teszt eredménye. A módszer hátránya, hogy nemcsak a hematin van katalitikus hatással a folyamatra, hanem egyes réztartalmú anyagok is. Mi

4. ábra. Különböző színű világító rudak





5. ábra. A Guinness Rekordok könyvében szereplő, valaha készített legnagyobb világító rúd működés közben

több, a háztartásokban gyakori hipó (amely egyébként kémiai nátrium-hipoklorit lúgos oldata) is mutathat ilyen jelenséget. Tehát, ha valaki vérfoltot hipóval akar eltávolítani, a luminoltesztben általában a teljes hipóval kezelt felület világítani kezd. Így ilyen esetben a vérnyomok már nem láthatók, mert elfedik őket a tisztítás sokkal kiterjedtebb nyomai.

A fényt kibocsátó kémiai reakciók alapján működnek a Magyarországon főleg az augusztus 20-i ünnep alkalmával, illetve szilveszter környékén árusított világító rudak (4. ábra). Ezek általában fényt átgengedő műanyagból készülnek, és a reakció belül, minden zavaró hatástól elszigetelve játszódik le bennük. Az aktiválás során lényegében összekeverik a két reaktáns; ez gyakran egy a rúdon belüli, vékony falú üveg-

ampulla összetörésével történik, s a rudak utána órákig fényt bocsátanak ki. Sem kapcsolni, sem újraindítani nem lehet őket, vagyis csak egyszer használatosak. Nagyjából két tucat olyan anyagot fejlesztettek ki eddig, amelyet világító rudakban használnak, az egyik leggyakoribb közülük a 2. ábrán B betűvel jelzett difenil-oxalát, amely kémiai szempontból szintén nem számít bonyolultnak és a luminolhoz hasonlóan az ára is kedvező. Maga a luminol nem ideális ilyen felhasználásra, mert a reakció viszonylag gyorsan, percek alatt véget ér, vagyis a rúd csak rövid ideig világítana.

Minden eddig használt világító rúdban közös, hogy a fényt okozó reakcióban ugyanarra az oxidálószerre, a hidrogén-peroxidra van szükség. A fénykibocsátás a szerves kemilumineszcens anyag és az oxidálószer

közötti reakcióban történik. Habár a kibocsátott fény színe valamelyest befolyásolható a használt szerves vegyület megválasztásával, igazából önmagában ezzel nem lehetne a 4. ábrán látható, látványosan sokszínű világító rudakat készíteni. Ezért egy harmadik komponens is megtalálható az ilyen elegyekben, ez általában egy fluoreszcenciát mutató festék. Rengeteg különböző anyag fluoreszkál, s a kibocsátott fény színe is könnyen szabályozható a molekulák szerkezetének megválasztásával. Így egy ilyen világító rúdban lényegében az történik, hogy a kémiai reakcióban kibocsátott kékes színű fény jelentős részét a festék még a rúdban lévő oldatban elnyeli, majd a saját fluoreszcenciájának megfelelő színű fényt bocsát ki, amely már elhagyja a rudat.

A világító rudaknak az ünnepek hangulatának emelésén kívül sokkal fontosabb gyakorlati szerepük is van. Hordozhatóak, vízhatlanok, nagy külső nyomás alatt is működnek, hőt gyakorlatilag nem termelnek és nem szükséges elektromos áram a működésükhöz, ezért vészhelyzetek esetén fényforrásként alkalmazzák őket. Sokan azt tartják, hogy természeti katasztrófák, például nagy földrengések után a világító rudak az egyetlen biztonságosan használható fényforrás. Katonai támaszpontok vészvilágító rendszere is gyakran kemilumineszcencián alapuló módszert használ fel. Búvárok is előszeretettel használnak világító rudakat, különösen nagyobb mélységekben. A Guinness Rekordok könyve nyilvántartja a világ legnagyobb világító rúdját, ezt az angliai Camber Sands-ben egy fesztivál megnyitásakor használták 2009. április 24-én: 254 cm magas volt és a Csillagok háborúja filmsorozatban szereplő fegyverhez, a fénykardhoz hasonlított (5. ábra).

Ugyan nem könnyű kemilumineszcenciát mutató reakciót találni a természet „laboratóriumában”, a több milliárd évnyi evolúció során azért kifejlődött néhány olyan állatfaj, amelyek szervezete ilyen elven bocsát ki fényt. Az élővilágban előforduló, fénykibocsátással járó jelenséget biolumineszcenciának is nevezik. Igazából a hagyományos kemilumineszcenciától való megkülönböztetésnek nincsen elvi jelentősége, hiszen a jelenség a megfelelő molekulák segítségével élő szervezeteken kívül, laboratóriumban is előidézhető. Meg kell jegyezni, hogy időnként a foszforeszcencia is előfordul a természetben; ilyenkor az élőlény lényegében a nappali világosságot „konzerválja” az éjszaka egy részére.

A biolumineszcencia legszélesebb körben ismert példája a szentjánosbogár esti fénykibocsátása. A biológusok a szentjánosbogár-félék (*Lampyridae*) családját a rovarok (*Insecta*) osztályában a bogarak (*Coleoptera*) rendjébe sorolják, ezen belül pedig a mindenevő bogarak (*Polyphaga*) alrendjébe. A családhoz nagyjából 2000 különböző faj tartozik, melyek a sarkvidékeken kívül



6. ábra. Nagy szentjánosbogár (*Lampyrus noctiluca*) nappal és biolumineszcenciája éjszaka

gyakorlatilag mindenhol előfordulnak. A trópusi és szubtrópusi éghajlat a legkedvezőbb számukra, de a hazánkhoz hasonló klímájú, mérsékelt övben sem ismeretlenek. Magyarországon három fajt találtak eddig: ezek a nagy szentjánosbogár (*Lampyrus noctiluca*), a kis szentjánosbogár (*Lamprohiza splendidula*) és a törpe szentjánosbogár (*Phosphaenus hemipterus*). A 6. ábra a nagy szentjánosbogár egy példányát mutatja be, a bal oldalon világosban, a jobb oldalon pedig sötétben, már fénykibocsátás közben.

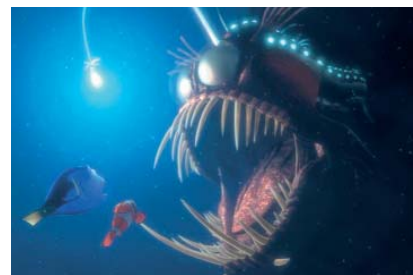
A Magyarországon előforduló szentjánosbogarak mérete öt milliméter és két centiméter között változik. Testük általában viszonylag lapos, külső kitinvázuk nem különösebben kemény, csápjuk rövid. Fejük a tor alá mélyen behúzott, így nem is látható felülről. A világító szervük potrohuk utolsó szelvényeiben van. Lárvaik ragadozó életmódot folytatnak: csigákat, apró rovarlárvákat fogyasztanak.

A bogarak fénykibocsátásának pontos színe, időtartama és gyakorisága fajonként változik. A fénykibocsátás célja elsősorban a hímek és a nőstények egymásra találása. E célból főleg az ivarérett nőstények világítanak, de a jelenség már korábbi életszakaszokban is megfigyelhető: a lárvák, bábok és tojások is bocsátanak ki némi fényt. Sajnos az elmúlt évtizedekben Magyarországon igen megritkultak ezek a bogarak, így egyre kevesebben figyelhetik meg nyári estéken a fénykibocsátásukat. A bogárfaj

közkeletű angol neve „firefly”, amit tűzlégynek lehetne fordítani. Vajon magyarul akkor miért nevezték el a bogarakat Szent Jánosról? A titok nyitja az időbeli egybeesés: a szentjánosbogarak rajzása általában a nyári napforduló, vagyis június 21. környékén a leglátványosabb. Keresztelő Szent János születésnapja június 24-re esett, a katolikus egyház ezt ünnepli Szent János napjaként, így a látványos fényjelenséget is erről nevezték el eleink.

A szentjánosbogarakban is a már bemutatott, mesterségesen megtervezett módszerekhez hasonló kémiai reakciók eredményezik a fénykibocsátást. A benne központi szerepet játszó szerves vegyületeket összefoglaló néven luciferinnek hívják: az eddigi kutatások azt mutatták, hogy különböző fajokban a luciferinek kémiai szerkezete nagyon különböző is lehet. Két molekula szerkezeti képletét mutatja be példaként a 2. ábra (C- és D-molekulák). A laboratóriumi kísérletekhez hasonlóan, az élőlényekben is szükséges valamilyen oxidálószer a jelenség kiváltásához, itt azonban ezt a szerepet a levegőben lévő oxigén játssza, katalizátorként pedig a luciferáz nevű enzim szolgál. Ennek szerkezete igen összetett: sok a aminosavegységből álló fehérje, amelynek két különböző képét mutatja be a 7. ábra. Természetesen a luciferáz összetétele is függ attól, hogy melyik fajban található meg, a 7. ábrán a nagy szentjánosbogárból izolált fehérje szerkezete látható.

A luciferin és luciferáz név alighanem ördögidézőnek tűnhet az olvasók szemében, s a biolumineszcencia általában kékes, gyengén derengő megjelenése is erősítheti ezt a vélt kapcsolatot. Valójában azonban lényegesen ártatlanabb a név eredete: a lucifer eredeti melléknévi jelentése latinul fényhozó, főnévként pedig gyakran az esthajnalcsillagra, vagyis az égbolton fénylő Vénusz bolygóra utalt. Csak jóval később kezdte a keresztény hagyomány ezt a szót az ördög megnevezésére használni.



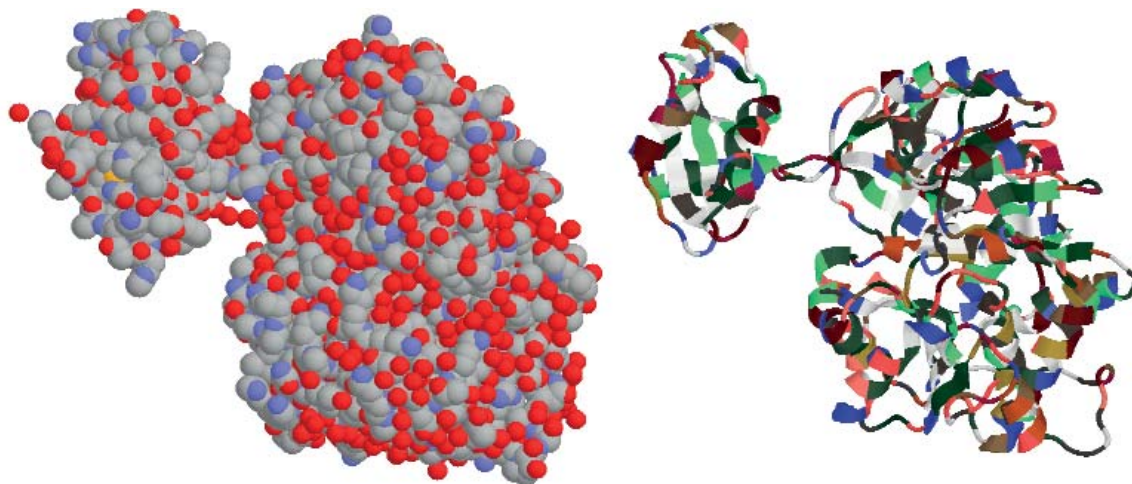
8. ábra. Biolumineszcens hal a *Nemo nyomában* című rajzfilmben

Bár a luciferineket az adott élőlények szervezete állítja elő, mesterséges előállításuk lényegesen drágább, mint a luminolé vagy a difenil-oxaláté, ezért nem is használják őket széles körben. A mesterségesen előállított luciferin (a 2. ábrán C) már egyetlen grammjért is ötmillió forintot kérnek, a luciferáz enzim pedig legalább tízszer ennyibe kerül. Persze ebből a felhasználók nagyon ritkán vesznek többet, mint egy gramm századrésze.

A biolumineszcencia jelensége nem korlátozódik a szentjánosbogarakra. Rovarak, halak, polipok, puhatestűek, gombák és baktériumok több tucat családja ismeretes, amelyek fénykibocsátásra képesek. A 2. ábrán látható D-molekula például egy olyan luciferin szerkezeti képletét mutatja be, amelyet az Új-Zéland Északi-szigetén élő *Latia neritoides* édesvízi csigafajból izoláltak.

Egyes halak biolumineszcenciája a Disney hollywoodi szakembereinek figyelmét is felkeltette. A 2003-ban bemutatott *Nemo nyomában* című rajzfilm gonosz világító hal figuráját (8. ábra) is egy biolumineszcenciát mutató halfajról mintázták (püpos horgászhal, *Melanocetus johnsonii*). Bizom benne, hogy a cikk olvasói a jelenségre így már megfelelően részletes magyarázatot tudnak majd adni kíváncsi gyermeküknek.

7. ábra. A szentjánosbogárban megtalálható luciferáz enzim két különböző képe



HORVÁTH GÁBOR

A fénysarkítás dicsérete

Látás poláros fénnel

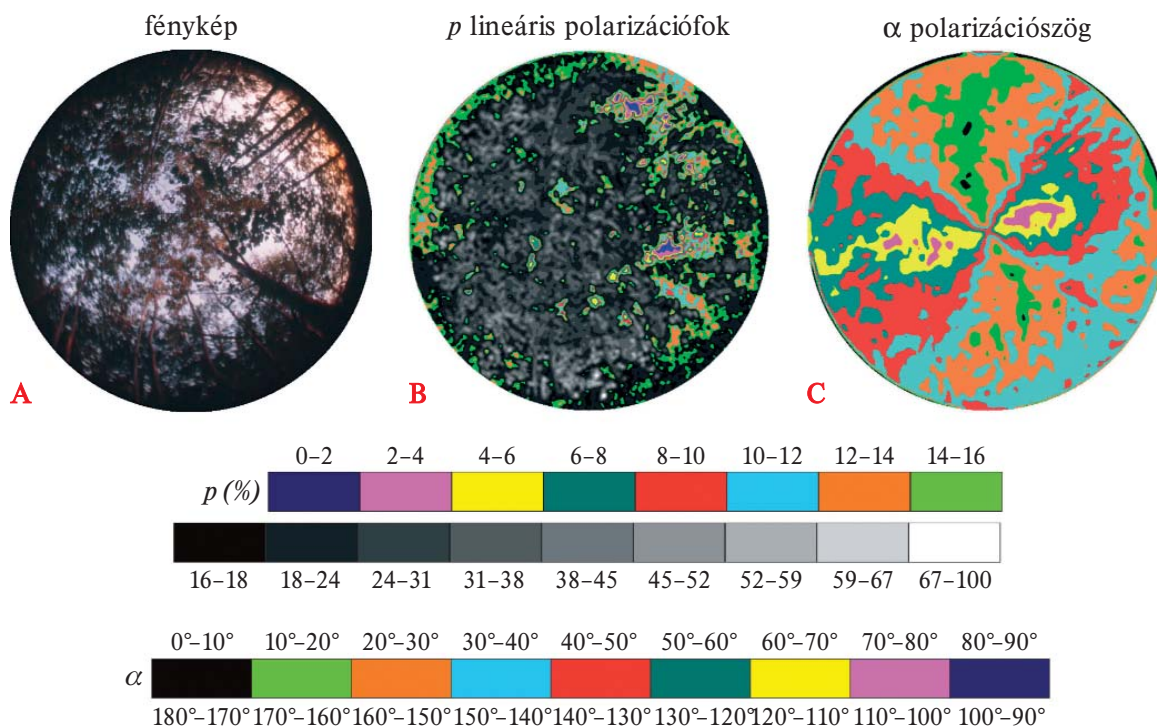
A különszám olvasóit minden bizonnyal meglepi majd e kissé szokatlan hangvételű írás. Célom a könnyedebb, tanmeseszerű stílussal csupán annyi volt, hogy a fénypolarizációval, annak érzékelésével és biológiai jelentőségével kapcsolatos jelenségeket olvashatósabbá, érthetőbbé tegyem a természettudományok iránt érdeklődők számára. A cikkben szereplő „Darwin”, akiről mindenkinek azonnal az evolúciós elmélet jut az eszébe, a biológiai evolúciót személyesíti meg, aki/ami elvont értelemben, szimbolikusan látja el jó tanácsokkal a hozzá forduló élőlényeket. Természetesen a tanmese minden részlete és információja tudományos eredményekre épül.

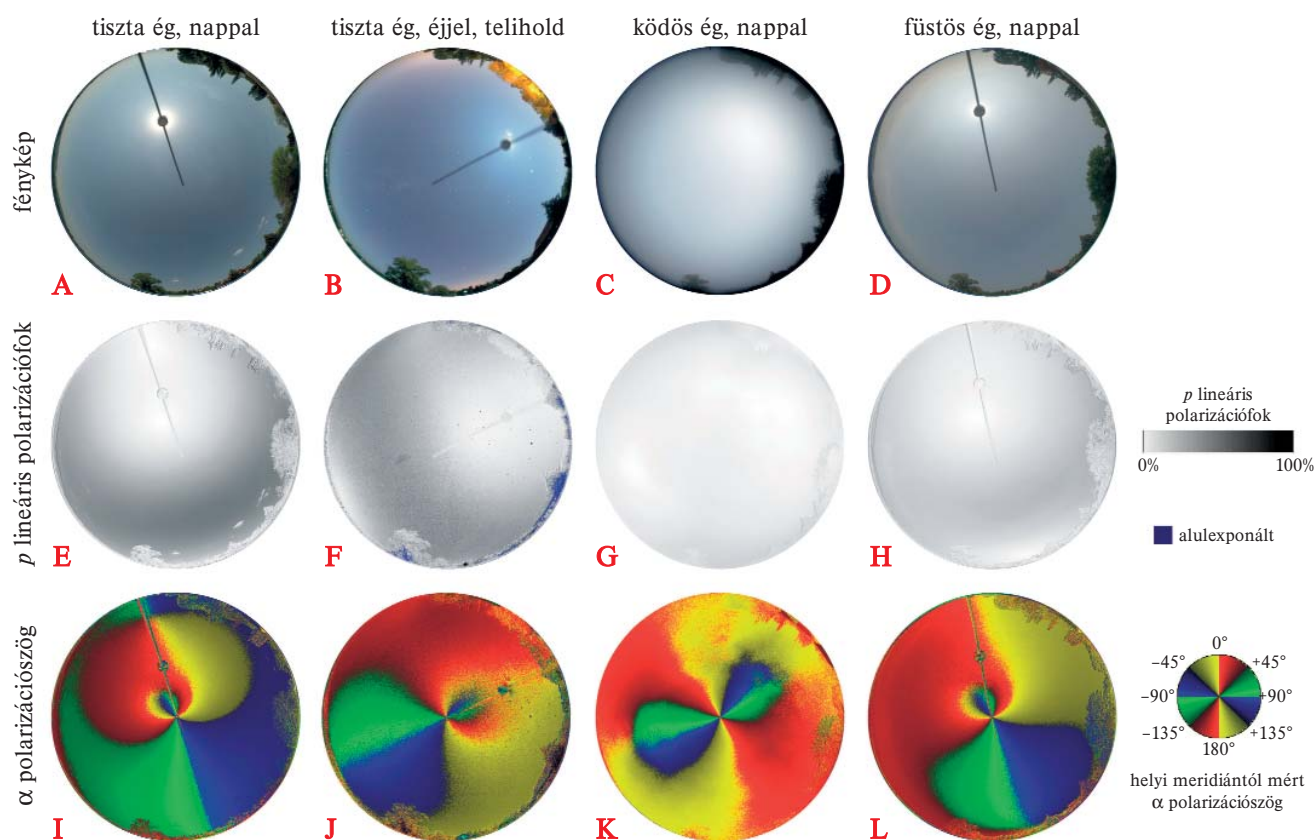
Darwin poláros tanácsokkal látja el a látásával elégedetlen méhet

Egy szép napsütöses délelőttön a méh (*Apis mellifera*) elindult nek-tárt és virágport keresni a trópusi őserdőben. Repülés közben a fölé boruló lombát nézve próbált tájékozódni és tartani az állandó repülési irányt, majd visszatérni faodúbeli fészékébe. Mivel mindez az irányfüggetlen lombmintázat miatt lehetetlennek bizonyult, kérte Darwint, hogy segítse ki. Darwin ekkor a méh szemének látósejtjeit (fotoreceptorait) polarizációérzékenyvé változtatta oly módon, hogy a fényelnyelő látópigmentek sokaságát 10 mikrométer nagyságrendbe eső hosszúságú, és 10 nanométer nagyság-

rendbe eső átmérőjű, egymással párhuzamos membráncövecskékbe zárta, melyek feszőfogszerűen türemkednek ki a fotoreceptor membránjából. A látópigment molekuláinak kissé meg kellene hajolniuk, hogy követhessék a membráncövecskék görbületét. Mivel maguktól nem tudnak így meggömbölni és a hőmozgás sem képes erre rávenni őket, ezért minden látómolekula a membráncövecskék hossz tengelyével párhuzamosan rendeződik el. A párhuzamos látópigmentek serege a rá eső sarkított fényből aztán annál többet nyel el, minél kisebb szöget zár be a látómolekulák tengelye a rezgéssíkkal. Végül tehát a beeső fény polarizációját az elnyelt fényintenzitásra fordítva kódolja a méhszem membráncövecskéiben párhuzamosan irányuló látómolekulák hada. Három eltérő irányú

1. ábra. A lemenő Nap fénye által megvilágított erdei lombátó fényképe (A), p lineáris polarizációfok-mintázata (B) és a helyi meridiántól (a zeniten és az ég vizsgált pontján átmenő főkörtől) az óramutató járásával egyező irányban mért α polarizációs szög eloszlása (C) 180° látószögű képalkotó polarimetriával mérve a spektrum zöld (550 nm) tartományában. A körök közepe a zenit, kerülete pedig a horizont. A C mintázaton az α polarizációs szög állandó értékeihez tartozó 8-as alakú tartományok tükrösszimmetria-tengelye a szoláris-antiszoláris meridián, ahonnan a Nap iránya könnyen kikövetkeztethető





2. ábra. Nappali tiszta égbolt (A, E, I), éjszeli teliholdas tiszta ég (B, F, J), nappali ködös ég (C, G, K) és nappali erdőtüztől füstös ég (D, H, L) fényképe (A–D), p lineáris polarizációfok-mintázata (E–H) és a helyi meridiántól mért α polarizációs szög-mintázata (I–L) 180° látószögű képalakító polarimetriával mérve a spektrum zöld (550 nm) tartományában. A körök közepe a zenit, kerülete pedig a horizont. Az α -mintázatok tükrösszimmetria-tengelye a szoláris-antiszoláris meridián, amiből a Nap iránya következtethető ki, amikor nem látszik a ködtől vagy füsttől. A képeken a Napot és Holdat egy dróton lévő kis fekete korong takarja ki

membráncsövecskéjű fotoreceptor agyba küldött elektromos jeléből a méh agya érzékeli a beeső adott színű (hullámhosszú) fény intenzitását, polarizációját (rezgéssíkját) és polarizációfokát (a fotonok hányad része rezeg polarizációirányban).

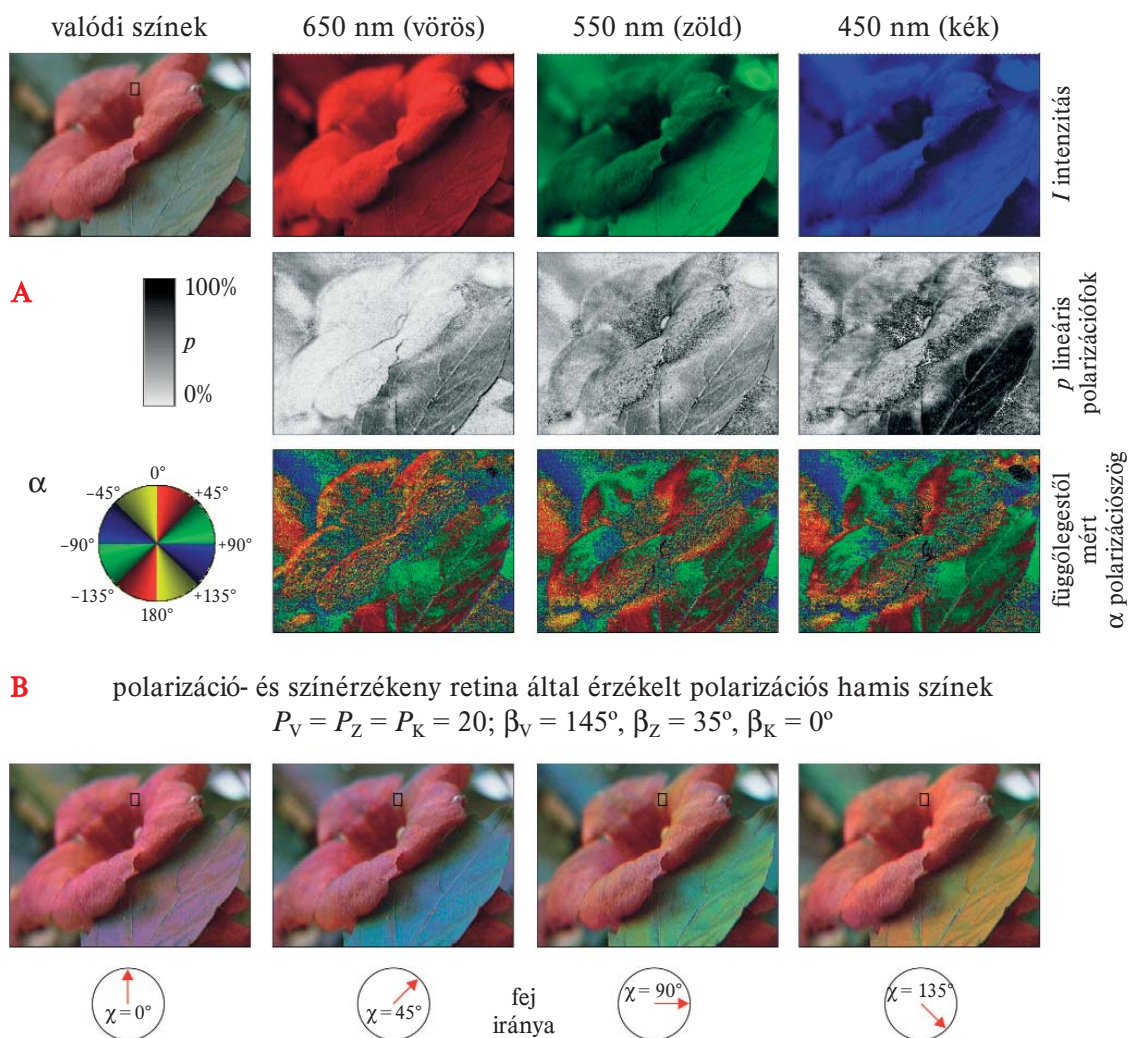
Mikor a polarizációra érzékeny szemű méh újra elindult az erdőben, a levelekről visszaverődő (szóródó és tükröződő) napfény polarizációirány-mintázata alapján most már mindig tudta, merre van a Nap, s repülési irányát ahhoz mérve már biztosan tudott tájékozódni az erdőben, ahol rendre hazatalált a gyűjtött virágpórral és nektárral. Nem kellett mást tennie, csak megkeresnie a lomb-sátor polarizációirány-mintázatának tükrösszimmetria-síkját, ami egybeesett a zenitén és a Napon átmenő égi főkör síkjával (a szoláris-antiszoláris meridiánnal), a Nap felé mutató szoláris meridián pedig a lomb-sátor világosabb felén volt (1. ábra).

Egyszer a méh kirepült az erdőből, és észrevette, hogy a rét sokkal több virága közt könnyebben találhat nektárt és virágpórt, így ott épített fészket. A méh akkor sem esett pánikba, mikor a mezei gyűjtögetés közben felhők takarták el a Napot mint fő viszonyítási égi jelét, hiszen hozzászokott, hogy az erdőben is elfedték a lombok az égboltozat jó részét. A felhős ég alatt ugyanazt tette, mint a lomb-sátor alatt: megkereste a felülről jövő égboltfény polarizációirány-mintázatának az égbolt világosabb oldala felé mutató, Napon átmenő tükrösszimmetria-tengelyét (2. ábra). Ily módon az erdőben szerzett polarizációs iránytűje jól működött a pusztai ég alatt is, miáltal mindig tudta, merre van a Nap, még akkor is, ha az nem látszott a felhők miatt.

A méhnél kiválóan használható égbolt-polarizációs iránytűvel Darwin számos más állatot is ellátott: a pompás királylepkét (*Da-*

naus plexippus) is, ami részben ennek segítségével tesz meg több ezer kilométert, amikor átrepüli Amerikát észak-dél irányban oda-vissza. A szivárványos pisztráng (*Oncorhynchus mykiss*) is ekkora nagyságrendű távolságokat úszik át a tenger és a születési/ívási helyéül szolgáló hegyi patak között. Az égbolt e mintázata az észak-amerikai szavanna vándorsármányt (*Passerculus sandwichensis*) is ilyen roppant távolságokon navigálja át. A Wichmann-tarisznyarak (*Dotilla wichmanni*) viszont csak egy tenyérnyi, deciméter átmérőjű tengerparti homokos fövényen használja az ég polarizációját, hogy amikor egy víz hullám elmossa a homok alatti ürege körüli kör alakú táplálkozó helyének felszínét, sugar irányban ott folytathassa a homokbeli tápláléksejcséket keresését, ahol a víz hullám miatt kénytelen volt abbahagyni. A szürkületkor trágyakupacból ivadékbölcsőül szolgáló galacsint készítő zambézi galacsinhajtó bogár (*Scarabaeus zambesianus*) pedig egyedül a napnyugta utáni ég polarizációja segítségével tudja galacsinját minél gyorsabban, vagyis nyílegyenesen eltávolítani a kupactól, nehogy az ott tülekedő fajtársai elorozzák az értékes galacsinját. Darwin a sivatagi rojtossujjú gyík (*Uma notata*) és az ökörbéka (*Rana catesbeiana*) ebihalának (lárvájának) nem a két fő oldalsó szemét tette polarizáció-érzékennyé, hanem a koponyatetőn lévő harmadik szemét, ami az égboltra néz, de lencse híján nem alkot képet, csak a felülről jövő fény intenzitását és polarizációját érzékeli.

Idővel a méhek egyre több nektárt és virágpórt kellett gyűjtenie a megsokasodott társai ellátására. Egyre többször tapasztalta, hogy amikor a rét zöld fűvében például kék virágot keresett, nem sikerült rábukkannia, mert ahogyan röptében közeledett egy kék folthoz, az folyamatosan színt váltott, ráadásul ugyanez történt min-



3. ábra. (A) Egy trombitafolyondár piros virágának és zöld levelének valódi színeit mutató fényképe, valamint a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mért I intenzitás-, p lineáris polarizációfok- és a függőlegestől az óramutató járásával megegyezően mért α polarizációs szög-mintázata. Jól látszik például, hogy a vörös tartományban a piros virág csak gyengén poláros, míg a kék tartományban a zöld levél erősen polarizálja a visszavert fényt. (B) Egy szín- és polarizáció-érzékeny méhretina által látott polarizációs hamis színek a rovarfej háti-hasi szimmetriatengelyének függőlegestől mért χ szöge függvényében. Miközben a méh forgatja fejét, a B ábrán látható lila, kék, világoszöld és sárga színűnek érzékeli a valójában zöld levelet, mert a levél erősen polarizálja a róla visszavert fényt. A matt virágszirom csak gyengén polarizál, ezért fejforgatáskor sokkal kevésbé változik a színe, mint a levélé. P_V , P_Z és P_K a vörös, zöld és kék fotoreceptorok egyformának feltételezett polarizáció-érzékenysége. β_V , β_Z és β_K a vörös, zöld és kék fotoreceptorok polarizáció-érzékeny membránsövecskéinek függőlegestől mért különböző irányszöge

den más színű folttal is (3. ábra). Ezért szinte lehetetlen volt repülés közben a szivárvány minden színében tündöklő réten megtalálni a színváltó virágokat. A méh csak abban bízhatott, hogy egy kéknek tűnő folt valójában egy kék virág, ahol nektárral tömheti meg bendőjét, és virággal töltheti föl lábai szörkosárcáit. Gyakran kellett csalódnia, mert a kék folt sokszor csupán levélnek bizonyult.

Ezért a méh ismét Darwinhoz fordult, kíváncsi, csináljon valamit az égi navigáció érdekében polarizáció-érzékenyebb szemével, ami oly sűrűn becsapja virágkeresés közben. Darwin ekkor a méh összetett szemének vízszintesen és lefelé néző szemecskéit (ommatidiumait) polarizáció-érzéketlenné változtatta azzal, hogy a fotoreceptorok egymással párhuzamos membránsövecskéit a receptor hossz tengelye mentén csigalépcsőszerűen megcsavarta. Így, ha a receptorra egy adott irányban rezgő sarkított fény esett, a szélrózsa minden irányában álló membránsövecskék által a poláros fényből elnyelt intenzitás kiátlagolódt, miáltal a beeső fény rez-

gessíkjától függetlenül mindig ugyanakkora mennyiségű fény nyelődött el. E polarizációra vak alsó szemféllel a méh már a virágok és levelek valódi színét észlelte, mert színérzékelését nem zavarta a polarizáció-érzékelés. Korábban a három különböző színérzékenységű (ultraviola – UV, kék, zöld) fotoreceptorok által elnyelt fény mennyiség nemcsak azért különbözött, mert a beeső fény színes volt, hanem azért is, mert a színes fény polarizált is volt, s így annak poláros tulajdonságaitól függően nyelődött el a szín- és polarizáció-érzékeny fotoreceptorokban. A három eltérő színérzékenységű receptortípus által elnyelt fényintenzitással arányos elektromos jelhármas kódolja a méh számára a színt. Ha a jelhármas egymáshoz képesti arányai bármely okból megváltoznak, a méh más színt észlel. Mikor a méh a réten repülve közeledik egy virághoz vagy levélhez, állandóan változó szögből látja azt, s a visszavert fény polarizációja (foka és iránya) is folytonosan változik, amiből a különböző szín- és polarizáció-érzékenységű fotoreceptorai folyamatosan változó mennyiségű fényt nyelnek el. Így az agy

felé küldött jelhármas is állandóan változik az időben, a nézett felület térben és időben változó, polarizáció-keltette hamis színét okozva (3. ábra). Amikor Darwin kikapcsolta a fotoreceptorok polarizáció-érzékelését, a méhagyba jutó jelhármas csakis a beeső fény színének változása miatt módosulhatott, vagyis a méh már nem észlelt polarizációs hamis színeket, s így könnyen megtalálta a rét állandó zöldjében a változatlan színű virágokat.

Darwin arra is ügyelt, hogy a méh eget néző ommatidiumai továbbra is polarizáció-érzékenyek maradjanak, hogy a viráglátogatás után a méh hazataláljon fészkebe. De a méh mégsem volt elégedett, mert habár az ég felhő- vagy lombmentes részeit kémelve a spektrum UV, kék és zöld tartományában egyforma biztonsággal volt képes érzékelni az égboltfény polarizációját, a felhős/lombos részekben gyakran nem észlelte a polarizációt a kék és zöld receptoraival. Emiatt újra Darwinhoz ment panasza, hogy orvosolja szemének e hiányosságát. Darwin rájött, hogy a felhőről/lombról összevissza, véletlenszerűen (diffúzan) szóródó napfény csaknem polarizálatlan, és igen UV-szegény, mert a felhő/lomb elnyeli az UV-t. E felhő/lombfényhez keveredik a felhő/lomb és a méh közti légrétegben Rayleigh-szóródó (vagyis a hullámhossz negyedik hatványával fordított arányban egyszerezsen szórt intenzitású) s ezért poláros napfény. A kevert fény polarizációfokát a polarizálatlan és UV-hiányos felhő/lombfény a kék és zöld tartományban jelentősen csökkenti, mely csökkenés elhanyagolható az UV-ben. Ezért a felülről jövő fény polarizációját nappal az UV-receptorokkal érdemes észlelni, mert azok még felhő/lomb alatt is képesek az égboltfény csökkent polarizációfokát érzékelni. Ezért Darwin a méh eget kémlelő szemrészében csak ezeket az UV-érzékeny receptorokat hagyta meg, így gazdájuk jól tud navigálni az ég polarizációirány-mintázata segítségével, amikor a Nap nem látható.

Történt azonban egyszer, hogy az erdő kigyulladt és sűrű füst borította az eget. Ekkor az éppen viráglátogató méh eltévedt, nem találta meg a méhlegelőt és a fészket. Kanadai rokonai minden nyáron ugyanerről panaszkodtak a több hónapos, rendszeres erdőtűz-szezonokban. Havonta többször előfordult az is, hogy mikor a méh szürkületkor aktív rokonai virágokat látogattak, és a félhold éppen fönt volt az égen, eltévedtek és fél óráig képtelenek voltak megtalálni a hazavezető irányt, míg a Nap teljesen le nem nyugodott, pedig ekkor is a jól bevált receptet, az égbolt-polarizációt hívták segítségül. Nagyon ritkán, évszázadonként átlagosan egyszer az is megtörtént, hogy néhány percre a Nap elé vonult a Hold, szürkületi sötétségbe borítva a méhlegelőt. A gyűjtögető méh ekkor is eltévedt, nem találta haza, hiába próbálta megkeresni a Napot az égbolt polarizációja alapján. E bosszantó eltévedések miatt a méh megint megkereste Darwint, hogy segítsen.

Darwin azonban ekkor már tehetetlen volt, és semmivel sem tudta biztatni a méhet. Elmagyarázta neki, hogy az erdőtűz sűrű füstjében a többszörösen szóródó napfény polarizációfoka annyira lecsökkenhet, hogy már a fölfelé néző, polarizáció-érzékeny UV-receptorok sem képesek azt érzékelni. Félholdas szürkületkor a légkörben szóródó napfény és holdfény polarizációs mintázatai vetekszenek egymással. Napnyugta előtt az erősebb napfényé győz, jóval napnyugta után pedig az akkora már intenzívebb holdfényé kerül uralomra. Mindkét esetben az égbolt polarizációirány-mintázatának tükör-szimmetriatengelye átmegegy az uralkodó égi fényforráson, a Napon vagy a Holdon, így ha azok felhőtakarásban vannak, irányuk akkor is kikövetkeztethető az ég polarizációjából. A köztes félóránban viszont az égi polarizáció szimmetriatengelyének iránya folyamatosan változik a Nap és a Hold iránya között, miáltal egyik égitest iránya sem következtethető ki egyértelműen. Napfogyatkozások pedig a jelentősen és állandóan változó fényviszonyok miatt az égbolt polarizációirány-mintázata is folyamatosan változik, és olyan szerkezetű, amiből nem lehet kitalálni a Hold által takart Nap irányát, habár az égboltfény polarizációfoka ilyenkor is elég magas e mintázat érzékeléséhez. E légköroptikai jelenségek okozta problémákra Darwin csak azt tudta taná-

csolni a méhnek, hogy ilyenkor ne repüljön, várja meg az ég füsttől való megtisztulását, a félholdas szürkületi átmenet elmúlását és a napfogyatkozás néhány perces teljességének megszűntét, hiszen ilyenkor lehetetlen az égbolt-polarizáció alapján kitalálni a nem látható Nap vagy Hold irányát, mint viszonyítási irányt. Mivel a méh és rokonai nem hallgattak Darwinra, ezekben az esetekben menthetetlenül eltévedtek és elpusztultak, mert a méhlegelőre a gyomrukban némi ráhagyással mindig csak annyi mézet visznek magukkal energiaforrásként, ami éppen elég a fészkek és a legelő közti oda-vissza út megtételéhez. Ha viszont több üzemanyagot cipelnének, akkor kevesebb nektárt és virágpport szállíthatnának haza. E csapdahelyzeteknek számos méh esik áldozatul, ez azonban nem veszélyezteti a méhpopulációkat.

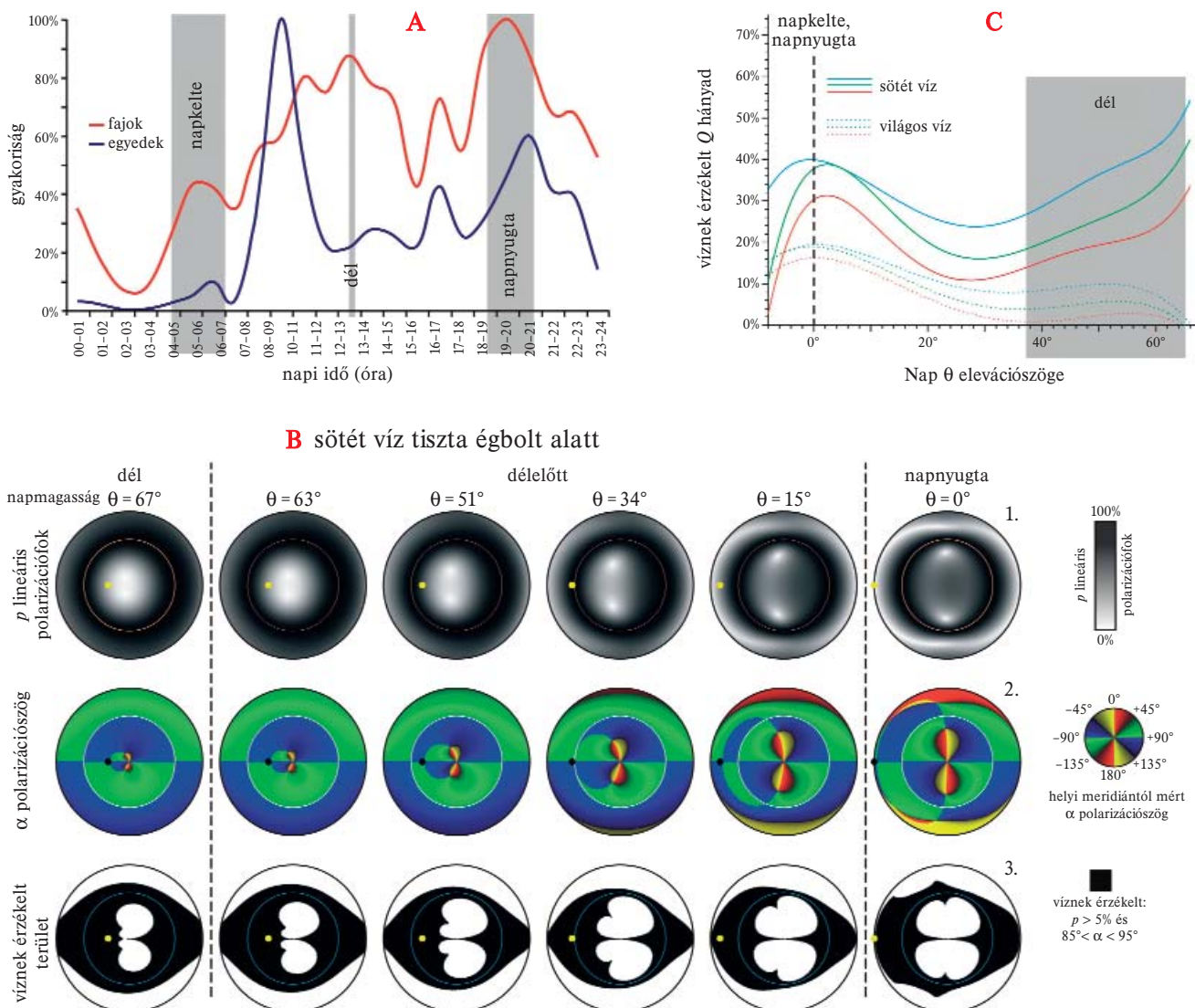
A tücsök és az ég poláros kékje

A mezei tücsök (*Gryllus campestris*) a rét fűszálai között csak néhány méter kiterjedésű területen élt és mozgott, mégis gyakran eltévedt, amikor megpróbált a fészkebe visszatérni az egyforma fűszálak jellegtelen dzsungelében. Rádadásul neki sokszor még a Nap sem segíthetett a térbeli tájékozódásban, mert a napnyugta utáni és napkelte előtti szürkületkor vagy éjjel aktív. Leutánozta hát a méh szemét, és a függőlegesen fölfelé meredő fűszálak között az égre nézve az égboltfény polarizációirány-mintázatának tükörszimmetria-tengelyéből határozta meg a horizont alatti Nap irányát és ahhoz igazította mászkálásainak mindenkorai irányát. Darwin azonban a méhhez ellentétben azt javallotta neki, hogy az ég polarizációját ne UV-érzékeny receptorokkal érzékelje, hanem a kék-érzékenyekkel. Az UV-receptorok ugyanis csak nappal, kellően erős fényben ideálisak az égboltfény polarizációjának érzékelésére felhők vagy lombok alatt. Szürkületkor olyan kicsi az égboltfény intenzitása a spektrum UV tartományában, hogy ekkor nemcsak arra kell ügyelni, hogy a polarizációfok a lehető legmagasabb legyen, hanem arra is, hogy elegendően intenzív legyen a szemet érő poláros fény.

Darwin ezért azt tanácsolta a tücsöknek, hogy az égboltfény poláros intenzitását, vagyis a fény intenzitásának és polarizációfokának szorzatát maximalizálja. Szürkületkor az égboltfény poláros intenzitása nem az UV-ben, hanem a kékben a legnagyobb, mert – habár felhős időben kékben a polarizációfok valamivel kisebb, mint UV-ben – az égboltfény intenzitása kékben jóval nagyobb, mint UV-ben. Ezért a tücsök a felülről jövő fény polarizációját a kékre érzékeny látósejtjeivel észleli, amivel napnyugta után és napkelte előtt egy-egy órával kitolta azon időszakot, amikor tájékozódni tud az égbolt-polarizáció segítségével. Rádadásul neki lett a polarizációra legérzékenyebb szeme, ami már 5% polarizációfokot is képes észlelni éjszakai megvilágítási körülmények között, szemben a nappal aktív méh 10%-os polarizáció-érzékelési küszöbével.

A lombok alatt napnyugtakor repkedő cserebogár

Látva a nappal aktív, UV-ben polarizáció-érzékeny méh és a szürkületkor-éjjel aktív, kékben polarizáció-érzékeny tücsök példáját, a közvetlenül napnyugta előtt a falombok alatt rajzó májusi cserebogár (*Melolontha melolontha*) tanácstalan volt azt illetően, hogy szemének fölfelé néző részében melyik színre érzékeny fotoreceptoraival észlelje a felülről jövő fény polarizációját, mert neki is szükséges a fák alatt biztonságosan tájékozódni akkor is, mikor a Napot lombok takarják. Darwin tanácsát követve, a harmadik utat választotta, és a zöldre érzékeny látósejtjeivel észleli a fény-polarizációt. Darwin ugyanis elmagyarázta neki, hogy napnyugta környékén a lombokat érő napfény spektrumának a vörös színben



4. ábra. (A) Egy polarizációs vizet utánozó fekete műanyag fóliával befogott vízirovarok egyedszámának (kék görbe) és fajszámának (piros görbe) változása a nap egyes óráiban. (B) Egy sötét vízfelületről tükröződő fény 180° látószögű képalkotó polarimetriával a spektrum zöld (550 nm) tartományában mért p lineáris polarizációfokának (1. sor), α polarizációs szögének (2. sor) és a vízfelszín polarizációs víznek érzékelt részének (3. sor, fekete) mintázata a Nap horizont fölötti θ szögmagassága függvényében tiszta égbolt alatt. A körök közepe a nadír (zenit tükörképe), kerülete pedig a horizont. A sárga pontok a Nap tükörképét mutatják, a belső kör pedig a Brewster-szöget jelzi, ahonnan mindig maximális polarizációfokú és vízszintesen poláros fény verődik vissza. (C) A polarizációs víznek érzékelt Q hányad (a 3. sor fekete területeinek hányada a körök területéhez képest) a Nap θ szögmagassága függvényében sötét és világos víz esetén a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában tiszta égbolt alatt. Látható, hogy sötét vizet alacsony napállásnál (reggel és este) érdemes keresni és mikor a Nap magasban áll (délben), míg világos vizet csak alacsony napálláskor, mert Q ekkor maximális

van maximuma, és a napfény intenzitása a csökkenő hullámhosszal rohamosan csökken a légköri fényszóródás és fényelnyelés miatt. A lombok alatti légrétegben szóródó vörös árnyalatú napfény polarizációfoka is a hullámhosszal együtt csökken. A lombok alatti fénytér eredő polarizációját a polarizálatlan zöld lombfény és a lombok alatt szóródó vöröses poláros fény együtt határozzák meg, aminek eredményeként a szemet érő poláros intenzitásnak a vörösben lesz maximuma, a zöldben valamivel kisebb mennyiség, végül a kékben és UV-ben a legkisebb. Ily módon a cserebogár vörösre érzékeny fotoreceptorokkal ellátva tudná a leghatékonyabban érzékelni a lombok alatti polarizációt. Mivel azonban Darwintól nem kapott vörös látósejteket, ezért a második legjobb megoldást választva, a zöld receptorait használja polarizáció-érzékelésre.

Darwin polarotaxissal vértel fel a vízipoloskát

Miután a hanyattszó vízipoloska (*Notonecta glauca*) kifejlődött a tócsájában és elkezdte rövid felnőtt életét, megtapasztalta, hogy csökken a vízbéli oxigén, fogy körülötte a víz, és a vízben egyre kevesebb a táplálék, amin egyre több társával kell osztoznia. Végül oly tarthatatlanná váltak életkörülményei, hogy kirepült az eddig lakhelyét szolgáló pocolyából és elkezdett újat keresni helyette. Mivel azonban addig a vízben élt, fogalma sem volt arról, miként is néz az ki felülről, így nem tudta azt sem, hogyan is bukkánhatna egy másikra röptében. Elrepült hát Darwinhoz, hogy adjon tanácsot. Azzal segítette ki, hogy a vízipoloska szemének alsó, hasoldali felét polarizáció-érzékenyítette, és azt tanácsolta,

Látás poláros fénnel

hogyan ha vizet akar lelteni, akkor csak a vízszintes rezgésű, alulról jövő fényt kutassa, s ha ilyenre bukkan, ugorjon fejést, mert az biztosan víz lesz. A reptében vizet kereső vízirovar ezentúl tehát a vízszintes poláros fényhez vonzódott, mely polarizációját Darwin köszönhetné. Nem is csalódott, mert korábban minden világosabb foltot vízcsillogásnak hitt, és gyakran pórul járt, amikor például a talaj napfényes részére vagy egy világos talajfoltra ugrott fejést. A természetben azonban minden nagyobb kiterjedésű, vízszintes poláros fényfolt tényleg pocolya, tócsa, tó vagy folyó, s így a vízirovar ezután nagy biztonsággal talált új víztestet, amikor a régiekben már nem folytathatta tovább életét.

A vízirovar sarkított panaszai

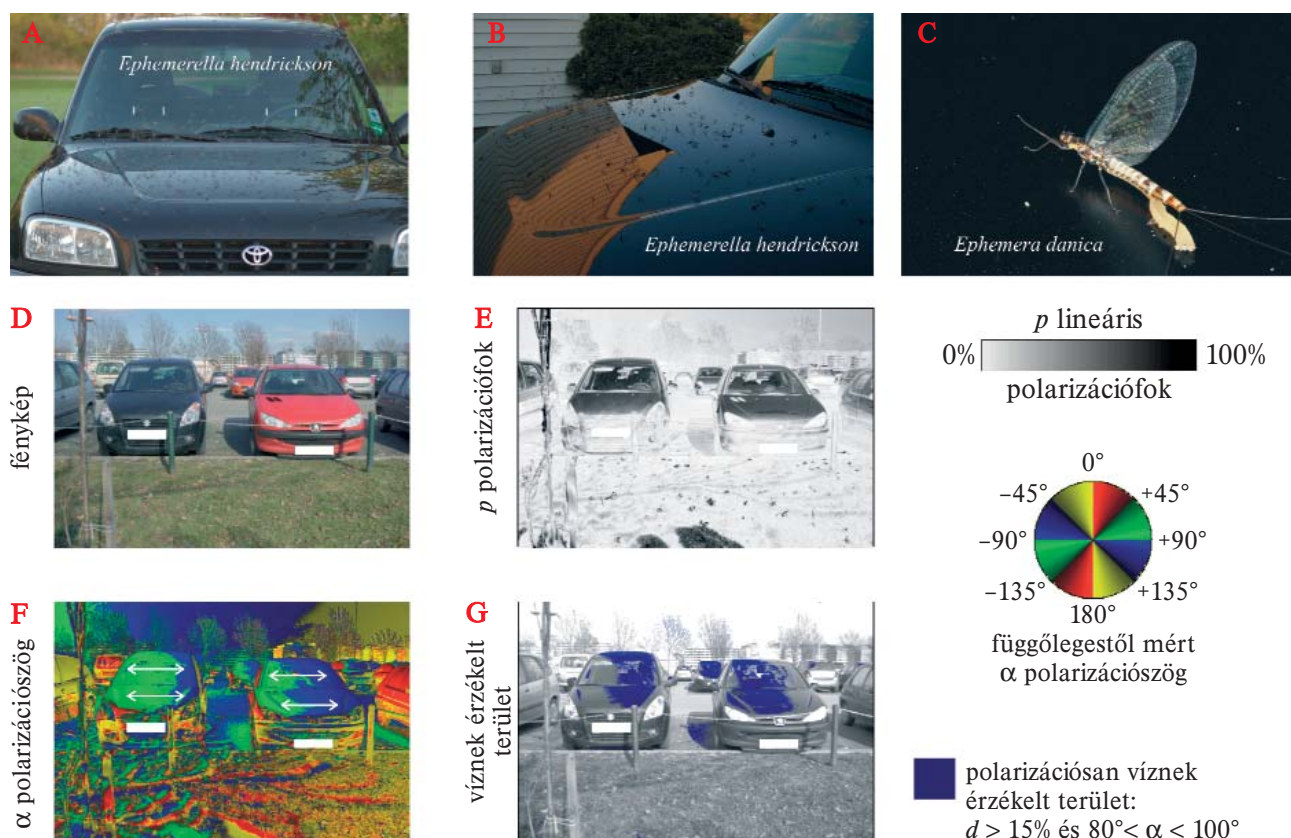
Polarizációs napóra és poláros fényszennyezés

Mikor a pocolya a vízi élet számára alkalmatlanná vált, a vízirovar a nap véletlenszerű szakaszaiban kelt szárnyra új, éltető vizeket fölkeresni, amire csak egy órája volt, különben reptében kiszáradt volna. De gyakran alig talált vizet. Darwintól kért ismét tanácsot, aki azt javasolta, hogy ha sötét vizet akar találni, akkor csak alacsony napállásakor, reggel és este keljen szárnyra, vagy akkor, mikor a Nap delel; ha viszont világos vizeket keres, akkor kizárólag csak reggel vagy este induljon el (4. ábra). Ugyanis, ha a vizet optikai távérzékeléssel keresi a róla tükröződő fény vízszintes polarizációja alapján, akkor a vízfelszínnek csak azon részei tűnnek víznek, melyekről a visszavert fény polarizációfoka a polarizációérzékelés küszöbe fölötti, a rezgésű pedig csak egy kü-

szöbszögnél kevesebbel tér el a vízszintesről (4B. ábra). A vízfelület polarizációs szempontból víznek érzékelhető hányada függ a Nap horizont fölötti magasságától (elevációs szögtől), mivel az égboltnak a Nap elevációjával változó polarizációs mintázata tükröződik a vízfelületről és a Fresnel-törvény szerint polarizációját változtatva befolyásolja a vízről visszavert fény eredő polarizációját, amihez hozzájárul a víz alól eredő fény polarizációja is. Fekete vizeknél a vízből alig származik fény, így szinte egyedül csak a tükröződő égboltnak a polarizációja dominál, aminek eredményeként a vízfelszín polarizációs szempontból víznek érzékelhető hányada akkor a legnagyobb, mikor a Nap a horizont közelében vagy éppen a legmagasabban tartózkodik, tehát reggel/este és délben (4C. ábra). Világos vizeknél a vízből származó fény úgy módosítja e képet, hogy a vízfelület víznek észlelhető hányada kizárólag csak alacsony napállásakor, azaz reggel és este maximális (4C. ábra).

Darwin tehát olyan polarizációs napórával látta el a vízirovar, amivel repülve a vizet reggel, délben vagy este kell keresnie, más napszakokban ugyanis sokkal kisebb eséllyel találja meg azt polarizációs (4A. ábra). Mivel azonban reggel még túl alacsony a légkör hőmérséklete a szárnyizmok működéséhez, ezért azt javasolta, hogy a vízirovar inkább később, kora délelőtt keljen szárnyra vizet kutatni, mikor a levegő már melegebb. A vízirovar hiába próbálná a vízkereséshez optimális napszakot a levegő hőmérséklete vagy relatív páratartalma vagy a szélsőségek alapján eltalálni, mert e légköri jellemzők a víz alól nem érzékelhetők, habár alacsonyabb légkör hőmérséklet, magasabb páratartalom és szélcsend kedvezőek lennének a kiszáradásmentes repüléshez. Ellenben a Nap elevációs szöge a víz alól is biztonsággal megbecsülhető a környező

5. ábra. (A, B) Egy poláros fényszennyező fekete autóra tömegesen szálló hendrickson kérészek (*Ephemerella hendrickson*, Rebecca Allen felvételei). (C) Egy fekete autóra petéző dán kérészek (*Ephemera danica*, Kriska György felvétele). (D–G) Egy fekete és piros autó fényképe, polarizációs mintázata, valamint polarizációs víznek érzékelt felületrészei a spektrum zöld tartományában. Az F ábrán a kettősfejű fehér nyilak az autók motorháztetejéről és szélvédő üvegéről tükröződő fény vízszintes polarizációját szemléltetik



fényintenzitás alapján. E polarizációs napórával tehát Darwin orvoslta a szegény vízirovar panaszat.

Azonban a vízirovar hamarosan egy újabb, súlyosabb panasz-szal kereste föl Darwint. Ugyancsak vízben élő rokonai ugyanis repülés közbeni vízkereséskor egyre sűrűbben elpusztultak, mert rejtélyes módon víznek hitték a természetben korábban elő nem forduló olyan fényes, fekete felületeket, mint például az aszfalt utak, fekete műanyag fóliák, üveglapok, fekete autókarooszériák (5. ábra), fekete sírkövek, olajkiömlések, napelemtáblák és napkollektorok. Hogyan védekezhetünk mindezek ellen? – kérdezte a vízirovar. Darwin csak a vállát vonogatta, mondván: valamit valamiért. Évmilliókig kiválóan működött a polarotaktikus vízkeresések. Az ember azonban teleszórtta a természetet az említett fényes, fekete tárgyakkal, melyek vízszintesen poláros fényt tükröznek, ha a visszaverődési sík függőleges. Ráadásul, mivel e tárgyak sima felületűek és feketék, ezért az általuk visszavert fény polarizációfoka nagyobb lehet a víztől tükröződő fényénél (5D–G. ábra), miáltal szupernormális ingerként még a víznél is vonzóbbak lehetnek számotokra, így sokszor rájuk is petéztek (5A–C. ábra) és e peték menthetetlenül ki is száradnak. E poláros fényszennyezésnek csak az áldozata lehet minden vízirovar a vízkeresést szolgáló polarotaxisa miatt. Darwin a problémát okozó embernek azt tanácsolja, hogy a poláros fényszennyező fényes, fekete felületeket tegye érdessé (mattá) és minél világosabbá (lehetőleg fehérré), vagy a zebráról példát véve, e fekete felületeket vonja be vékony fehér vonalakkal álló csík- vagy rácsmintázattal. Ez utóbbi mintázat ugyanis igen hatékonyan csökkenti a polarotaktikus vízirovarok vízszintesen polarizáló fekete felületekhez való vonzódását.

Darwin becsíkozza a zebrát a vérszívó bögölyök ellen

Egyszer Darwint fölkereste a ló és a szarvasmarha is, hogy mit lehetne tenni a bögölyök ellen, melyek vérszívó nőtényei állandóan zaklatják őket, nagy vérvesztést okozva, veszélyes betegségek kórokozóit terjesztve, továbbá nem hagyva a legelést és pihenést. Darwin persze megértette a nőtény bögölyt is, aminek azért kell vért szívnia, hogy kifejlődhessenek petéi, amiket aztán víz fölé hajló levelekre rak, hogy a lárvák a vízbe pottyanjának, ahol tovább fejlődnek. Darwin tanácsára a bögöly is polarotaxisál találja meg a vizet, ahol a hím és nőtény bögölyt ihat és fölhevült testét fürdészel hűtheti, ahol a nőtény vérszívásra alkalmas ivó/fürdőző lovat és szarvasmarhát (gazdaállatot) lelhet, ahol hím és nőtény bögölyt randevúzhat az utódok létrehozása céljából, s ahol a nőtény a petéit a vízszéli növényekre rakhatja. Sőt, a nőtény bögöly nemcsak a vizet keresi a víztükrőről visszaverődő vízszinte-

sen poláros fénnel, hanem még a vérszívásra alkalmas gazdaállat megtalálásában is segítségére van a gazdáról visszavert fény polarizációfoka, függetlenül a polarizációiránytól. Minél polárosabb egy gazdaállat, annál több bögölyt vonz, aminek nem örülnek a fekete és barna lovak, de a sötét szőrű marhák (6. ábra) sem. Viszont ennek haszonélvezői a fehér és szürke lovak és marhák, mert őket jóval kevésbé zaklatják a bögölyök. Nagyon ügyesen kitalálta ezt Darwin, mert a bögölyön kívül nincs más állat, ami ennyire a polarotaxisára lenne utalva az életben maradásában és fajfenntartásában.

Darwin azt tanácsolta a fekete/barna lovaknak és marháknak, hogy vegyenek példát a fekete-fehér csíkos zebráról vagy a tarkafoltos szarvasmarháról, mert ők annál kevesebb bögölyt vonzanak, minél számosabbak és vékonyabbak/kisebbek a csíkjaik és foltjaik (6. ábra). Ha nem tudtok becsikosodni vagy befoltosodni, akkor forduljatok az emberhez és kérjétek kölcsön a visszavert poláros fénnel működő rovarcsapdáit a bögölyök gyérítésére – mondta Darwin.

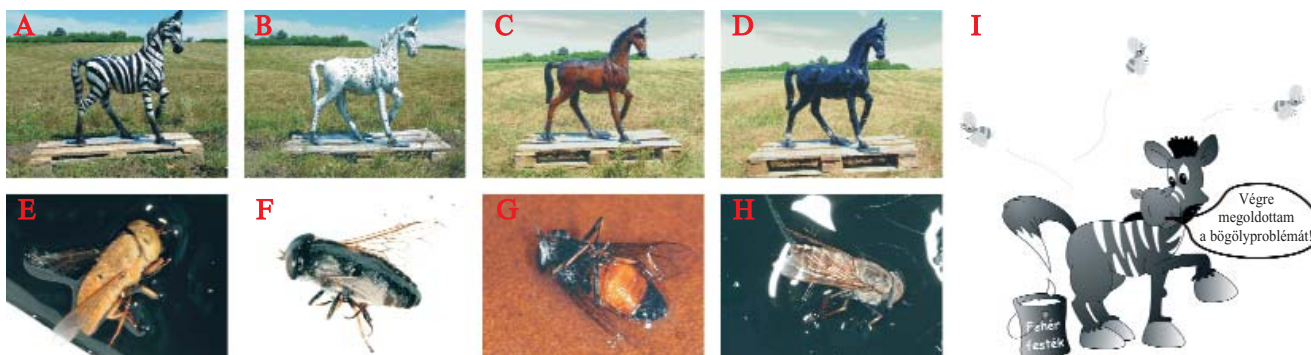
A cirkulárisan polarizáló testű szkarabeusz

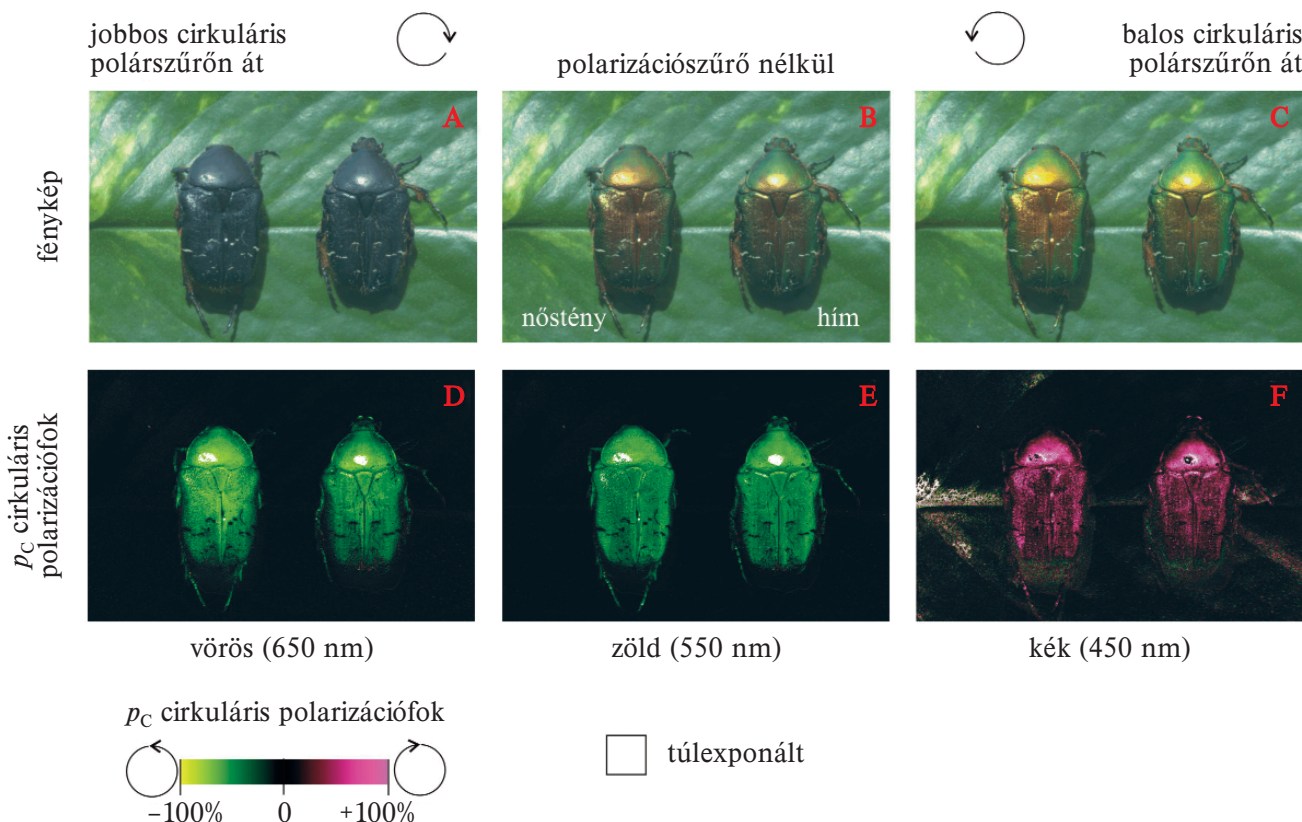
Az aranyos rózsabogár (*Cetonia aurata*, a Scarabaeidae családba tartozó bogarak) egyszer azzal toppant be Darwinhoz, hogy tegye a szemét érzékennyé a cirkulárisan poláros fényre, mert akkor úgy tudna titkos optikai jelekkel üzeni a fajtársainak, hogy azt az ellenségei nem vennék észre. Ugyanis éppen Darwin intézte el, hogy például a szkarabeusz kitérőpáncélja balra cirkulárisan poláros fényt verjen vissza, és zöldes fémmfényű színe jól beolvadjon az élettér növényeinek zöldjébe (7. ábra). Mivel Darwin a zöld leveleket nem tette cirkulárisan polarizálhatóvá (7. ábra), ezért egy levélben ülő zöld szkarabeuszt nem vesz észre egy rá vadászó madár, aminek szemét Darwin szintén úgy alkotott meg, hogy érzéketlen legyen a cirkulárisan poláros fényre.

Nos, ha a szememet cirkulárisan polarizáció-érzékennyé változtatnád – mondta a szkarabeusz Darwinnak –, akkor már távolról észrevehetném fajtársaim cirkulárisan poláros jelét a növényi környezetben (7. ábra), s azok is az enyémet, míg a ránk vadászó madarak szeme előtt továbbra is rejtve maradnánk. Habár igazad van, várj még több millió évet, amíg kérésed teljesíthetem – válaszolta Darwin.

Erre a szkarabeusz megsértődve vetette Darwin szemére: bezzeg a harlekin sáskarák (*Odontodactylus scyllarus*) szemét érzékennyé varázsolta nemcsak a színekre, hanem a lineáris és cirkuláris polarizációra is, valamint a szívárvány színeiben pompázó meszes páncélját lineárisan és cirkulárisan polarizálhatóvá tette,

6. ábra. Rovarfogó ragaccsal bekent zebracsíkos (A), fehér (B), barna (C) és fekete (D) ló modellje egy réten, ahol rengeteg bögöly szálldosott. A zebracsíkos (E), fehér (F), barna (G) és fekete (H) lómodell által csapdázott nőtény bögölyök. A legtöbb vérszívó nőtény bögölyt a fekete ló vonzza, a barna valamivel kevesebbet, a fehér jóval kevesebbet, a legkevesebbet pedig a zebra. (I) A zebracsíkok bögölyöktől védő vizuális hatását szemléltető karikatúra (Kriska György felvételei és rajza)





7. ábra. Egy márványos szobaifutóka (*Epipremnum pinnatum*) növény levelén nyugvó nőstény és hím *Cetonia aurata* rózsabogár polárszűrő nélküli fényképe (B), valamint jobbos (A) és balos (C) kör alakú nyílak a polárszűrők által áteresztett fény körkörös polarizációjának forgásirányát szemléltetik. (D–F) A rózsabogarakról és a levélről visszaverődő fény p_c körkörös polarizációfoka a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mérve, ahol a zöld, illetve lila színárnyalatok balra, illetve jobbra körkörös polarizációt jelentenek

hogy meg tudja magát különböztetni a hozzá nagyon hasonló szín- és polarizáció-mintázatu rokonaitól, melyek közvetlen közelében élnek. Darwin azzal vigasztalta a látásával elégedetlen szkarabeuszt, hogy talán hamarosan kiderül, a kitinpáncélját fedő kitinrostok csavart szerkezetű elrendezésének nem is az a szerepe, hogy a visszavert fény körkörös poláros legyen, hanem inkább az, hogy e néhány száz 10 nanométer vastagságú vékony réteg védje a bogarat a mechanikai sérülésektől és/vagy a talajbeli és/vagy a táplálékul szolgáló rothadó gyümölcsökből savak és/vagy lúgok káros kémhatásától.

Köszönetnyilvánítás: Fénypolarizációs kutatásaimat a K-105054 számú OTKA pályázat támogatja. Köszönöm Farkas Alexandra doktoranduszomnak, hogy átnézte és javította a kéziratot. Továbbá köszönnetel tartozom társszerzőimnek az itt ismertetett tudományos eredményeink [1–9] eléréséért.

Irodalom

- [1] Horváth G., Zeil J. (1996) Kuwait oil lakes as insect traps. *Nature* 379: 303–304.
- [2] Horváth G., Gál J., Labhart T., Wehner R. (2002) Does reflection polarization by plants influence colour perception in insects? Polarimetric measurements applied

to a polarization-sensitive model retina of *Papilio* butterflies. *Journal of Experimental Biology* 205: 3281–3298.

- [3] Horváth G., Varjú D. (2004) *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York, p. 447.
- [4] Csabai Z., Boda P., Bernáth B., Kriska G., Horváth G. (2006) A “polarisation sundial” dictates the optimal time of day for dispersal by flying aquatic insects. *Freshwater Biology* 51: 1341–1350.
- [5] Sipőcz B., Hegedűs R., Kriska G., Horváth G. (2008) Spatiotemporal change of sky polarization during the total solar eclipse on 29 March 2006 in Turkey: polarization patterns of the eclipsed sky observed by full-sky imaging polarimetry. *Applied Optics* 47 (34): H1–H10.
- [6] Horváth G., Kriska G., Malik P., Robertson B. (2009) Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 317–325.
- [7] Egri Á., Blahó M., Kriska G., Farkas R., Gyurkovszky M., Åkesson S., Horváth G. (2012) Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology* 215: 736–745.
- [8] Blahó M., Egri Á., Hegedűs R., Jósavai J., Tóth M., Kertész K., Biró L. P., Kriska G., Horváth G. (2012) No evidence for behavioral responses to circularly polarized light in four scarab beetle species with circularly polarizing exocuticle. *Physiology and Behavior* 105: 1067–1075.
- [9] Horváth G. (editor) (2014) *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York, p. 649.

A szerző Természet Világában megjelent, fénnel kapcsolatos néhány cikke:

- Horváth G. (1985) Tévedett az Alföld költője? A délibáb fizikája. *Természet Világa* 116: 423–425
- Horváth G. (1986) Fényszóródás a természetben. *Természet Világa* 117: 250–254
- Horváth G. (1986) Kék szín a természetben. *Természet Világa* 117: 298–301 + címlap
- Horváth G. (1987) Búvároptika. Optikai jelenségek a levegő és a víz határán. *Természet Világa* 118: 298–303
- Horváth G. (1989) Biooptika, avagy mit tanulhat az optikus egy vízirovarról. *Természet Világa* 120: 246–251

- Horváth G. (1993) Az állatvilág Schmidt-teleszkópja? A fésűskagyló különös látórendszere. *Természet Világa* 124: 500–505
- Horváth G., J. Zeil (1996) Állatcsapdák, avagy egy olajtöcsa vizuális ökológiája. *Természet Világa* 127: 114–119
- Molnár G., Blaha B., Horváth G. (1997) Látás az ibolyán túl: Az ultraviola fény érzékelésének elterjedése és szerepe az állatvilágban. *Természet Világa* 128: 155–159 + címlap
- Gál J., Horváth G., E. N. K. Clarkson, Haiman O. (1999) Bifokális szemek és szemüvegek: A trilobiták szemétől a szemlencseprotézisig. *Természet Világa* 130: 168–172 + 218–223 + címlap

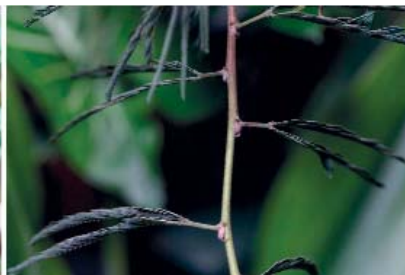
SZABAD JÁNOS

Belső óra, napi ritmus

Mindünknek természetes, hogy reggel felkelünk, napközben aktív életet élünk, dolgozunk, táplálkozunk, aztán esténként elálmósodunk, lefekszünk és átalusszuk az éjszakát. Észre sem vesszük, hogy életünk eme szakaszai naponta ismétlődnek, évtizedeken át. Vajon miért ébredünk fel reggelente, és miért álmosodunk el esténként? Mi az a mechanizmus, amely életünk napi ritmusát szabályozza? Talán egy belső óra? Ha létezik belső óra, mi az, és hogyan szabályozza az élőlények napi ritmusát? Mi állítja be a belső órát? A fény? És hogyan? Mi történik, ha meghibásodik a belső óra? Az áttekintés a fény, a belső óra és a napi ritmus varázslatos világával ismerteti meg érdeklődő olvasóinkat.

A világ legtermészetesebb dolga, hogy az életfeltételek mások nappal és éjszaka, mi több, az évszakok során is váltakoznak. (Magyarországon a leghosszabb nappal 16, a legrövidebb mindössze 8,5 óráig tart.) Az ok is ismert: Földünk naponta fordul egyet tengelye körül, és évente bejárja Nap körüli pályáját. Természetes, hogy csak azok az élőlények maradhattak életben és a népesíthették be Földünket, amelyek tudtak alkalmazkodni a környezeti feltételekhez, köztük a nappalok és az éjszakák, az évszakok váltakozásához. Vajon miként teszik?

A napi ritmus első írásos említése az időszámításunk előtti negyedik századból ered: Androszthenész hajóskapitány írta le, hogy a tamarindusz fa (*Tamarindus indica*) levelei napközben kiterülnek, napnyugta után összezárulnak. A folyamat naponta ismétlődik. Amint a tamarinduszé, a mimóza levélzete is kinyílik nappalra, és összezárul éjjelre (1. ábra). Különös, hogy ha a mimózákat folyamatosan sötétben tartják, leveleiket ugyanabban a ritmusban tárják ki, majd zárják össze, mint azt a nappalok és éjszakák váltakozása során teszik. A megfigyelés azt sugallta Jean-Jacques d'Ortous de Mairan francia kutatónak 1729-ben, hogy a mimózákban létezik egy belső óra, ami a levelek „viselkedését” irányítja.



1. ábra. A mimóza (*Mimosa pudica*) levélzete nappal és éjszaka

Az élőlények életének napi ritmusa már általánosan ismert tény. Régi megfigyelés például, hogy a kolibrik minden éjszaka hibernálnak: testük nappali, 40–42 °C-os „üzemi” hőmérséklete éjszakánként 18–22 °C-ra csökken. (Tápanyagtartalékuk oly’ csekély, hogy ha éjszaka is tartanák testük magas hőmérsékletét, reggelre kimerülne energiaforrásuk.) Napkelte előtt 20–30 perccel dideregni kezdenek, izmaik remegésének hőjétől felmelegszik testük, hogy aztán élhessenek az új nappal kínálta lehetőségekkel (2. ábra). Honnan tudják, hogy közeleg a napkelte? Talán a belső órájuktól?

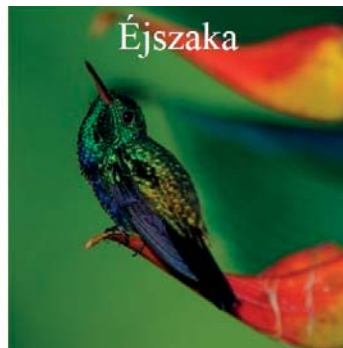
Napi ritmus szerint változik – egyebek mellett – a muslicák, az özek napi aktivitása: napkelte és napnyugta körül aktívak, éj-

jel és napközben többnyire pihennek. Régóta ismert tény, hogy napi ritmus szerint változik például az ember testhőmérséklete, vérnyomása, egyik-másik hormonjának koncentrációja (3. ábra). Akkor is, ha napokon át sötétben éljük életünket. Vajon mi és miként szabályozza az életjelenségek ritmusát, és mi annak értelme?

A napi ritmus kifejezés Franz Halberg-től származik az 1950-es évekből, és olyan biológiai folyamatokra vonatkozik, amelyek nagyjából 24 órás ciklusos váltakozást mutatnak. A napi ritmus lényegében a létfeltételekhez alkalmazkodás egyik eszköze: az anyagcsere-folyamatok szinkronizálása a változó környezethez.

A napi ritmus először a cianobaktériu-

2. ábra. A kolibrik testhőmérséklete nappal 40–42 °C, éjszaka mindössze 18–22 °C. Napkelte előtt, miközben dideregnek, testük felmelegszik



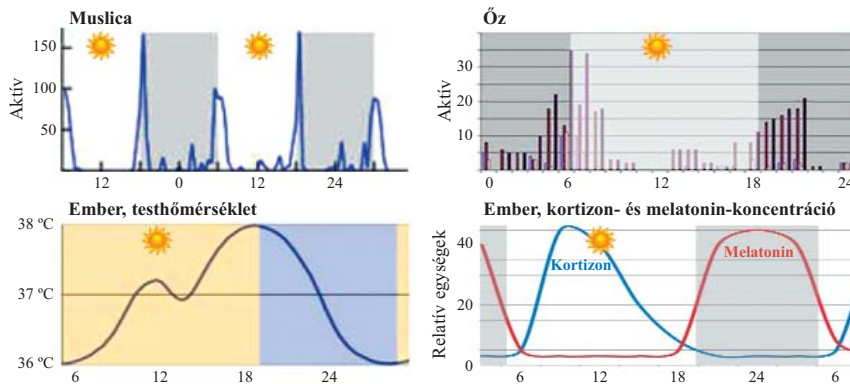
mokban alakult ki, bő három milliárd éve. Ők bontottak először vizet a napfény energiájával. Miközben a vízből nyert hidrogénnel CO₂-ot redukálnak, megsztetizálják szerves anyagaikat. A felszabaduló O₂ „hozadékaként” káros hatású oxigéngyökök is képződnek. Nem véletlen, hogy a cianobaktériumok DNS-ének replikációja éjszakánként történik. A cianobaktériumok belső órája három ún. Kai fehérjeféleségből áll. (Kai japánul ciklust jelent.) A Kai fehérjék kölcsönhatásai szabályozzák az életfolyamatok nagyjából 24-órás ciklusát, és aktivitásuk akkor is 24-órás ciklusú, ha – ATP jelenlétében – oldatban tartjuk őket.

A belső óra molekuláris biológiája

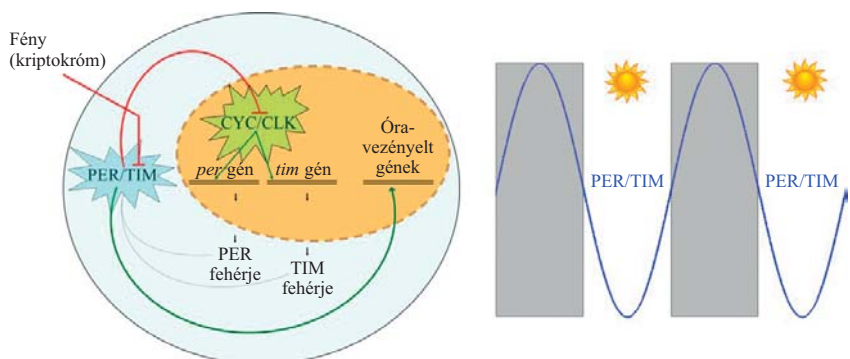
Mivel öröklődik az élőlényeknek az a képessége, hogy van belső órájuk, léteznie kell olyan ún. óragéneknek, amelyek a belső óra fehérjét kódolják. Amennyiben valamely óragén elveszti funkcióját, várható, hogy megszűnik a belső óra, esetleg a megszokottnál lassabban, vagy gyorsabban kezd járni, megszűnik, vagy megváltozik a napi ritmus. E gondolatmenet alapján indukált mutációkat és izolált olyan muslicamutánsokat Ron Konopka és Seymour Benzer 1971-ben, amelyek napi ritmusa eltért vad típusú társaikétól. A mutációk lényegében olyan eszközök, amelyekből kiindulva megismerhető az ép gén molekuláris funkciója. Az első megismert óragén a muslica *period* génje volt, amelyet aztán követett a többi. A génfunkciók alapján vált ismertté a muslica belső órájának működése (4. ábra). A *per* (*period*) és a *tim* (*timeless*) gének terméke, a PER/TIM fehérjekomplex a belső óra „rugója”. Gátolja a CYC/CLK fehérjekomplex funkcióját. (A CYC fehérje képződését a *cycle*, a CLK-t a *clock* gén kódolja.) Az aktív CYC/CLK komplex aktiválja a *per* és a *tim* géneket, ám ha aktivitásuk gátolt, a PER/TIM komplexből csak kevés képződik. Amint pedig csökken a CYC/CLK-ra kifejtett gátló hatás, bekapcsolhatják a *per* és a *tim* géneket, ami nyomán növekszik a PER/TIM komplex koncentrációja, és így tovább. Végeredményben a PER/TIM koncentráció 24-órás ciklusban változik (4. ábra). A PER/TIM páros szabályozza az ún. óra vezényelt gének működését is, amelyek aztán megvalósítják a muslica napi ritmusát.

A belső órát a fény állítja be (4. ábra). A kriptokróm fehérje kék fény jelenlétében aktiválódik, ami nyomán lebomlanak a TIM fehérjemolekulák, csökken a PER/TIM komplex koncentrációja, gátló hatása, és így tovább. Végeredményben a fény szabályozott belső óra szinkronizálja a muslica életfolyamatait a fény/sötét viszony naponkénti változásához.

Miután fény derült a muslica belső órájának molekuláris természetére, adódott a



3. ábra. Példák a napi ritmusra: a muslicák és az őzek aktivitásának, valamint az ember testhőmérsékletének, és két hormon koncentrációjának változása a napszakok folyamán. A testhőmérséklet-változáson megfigyelhető kis „völgy” a délutáni szieszta alapja. A kortizon a mellékvesekeg egyik szteroid hormonja. Munkavégzésre mozgósítja – más hormonokkal egyetemben – a szervezet energiaforrásait. A melatonin a tobozmirigy hormonja, a napi ritmus szabályozója



4. ábra. A muslica (*Drosophila melanogaster*) belső órája, valamint a PER/TIM fehérjekomplex koncentrációjának változása a napszakok folyamán (magyarázat a szövegben)

kérdés: vajon a *period* génből és társaiból kiindulva megismerhető-e a magasabb rendű élőlények belső órája? A muslica óragének DNS-e alapján azonosították a gerinces állatok óragénjeit, és ismerték meg szerepüket a napi ritmus szabályozásában. Kiderült, hogy a muslica és a gerinces állatok belső óráját lényegében ugyanazok az óragének alkotják, a kódolt fehérjék azonos, vagy nagyon hasonló feladatokat látnak el. Voltaképpen arról van szó, hogy az evolúció során kialakult egy olyan mechanizmus, amely az élőlények tevékenységét a napszakok váltakozásához szinkronizálja. És minthogy a mechanizmus bevált, megőrződött sok-sok százmillió év során. Természetesen vannak kisebb-nagyobb különbségek, ám a belső órák „rugói” lényegében azonosak az egész állatvilágban.

Az óragének megismerése után nyílt lehetőség arra, hogy fény derüljön a napi ritmussal kapcsolatos egyik-másik öröklődő nyomorúságunk okaira. Az ember *period* génjének ma már jól ismert mutációi a FASPS alvási rendellenességet okozzák. (Angolul: Familial Advanced Sleep Phase Syndrome.) A FASPS szindrómás ember-

társaink, bár naponta körülbelül nyolc órát alszanak, ám a tyúkokkal fekszenek és kelnek: este 6–7 körül elálmósodnak, nyugovóra térnek, és másnap hajnalban 3–4 óra körül már ébren vannak. A DNS és a mutáció következménye között fennálló kapcsolat ismeretében egy egyszerű DNS-vizsgálattal megállapítható, hogy egy 10–12 hetes magzat felnőtté fejlődve FASPS szindrómás lesz-e vagy sem. Egy további példát mutatja, hogy az egér *clock* óragénjének mutációi falánksághoz, elhízáshoz, rendellenes cukoranyagcseréhez és cukorbetegséghez vezetnek. Az egerben megismert helyzet – úgy tűnik – érvényes az emberre is.

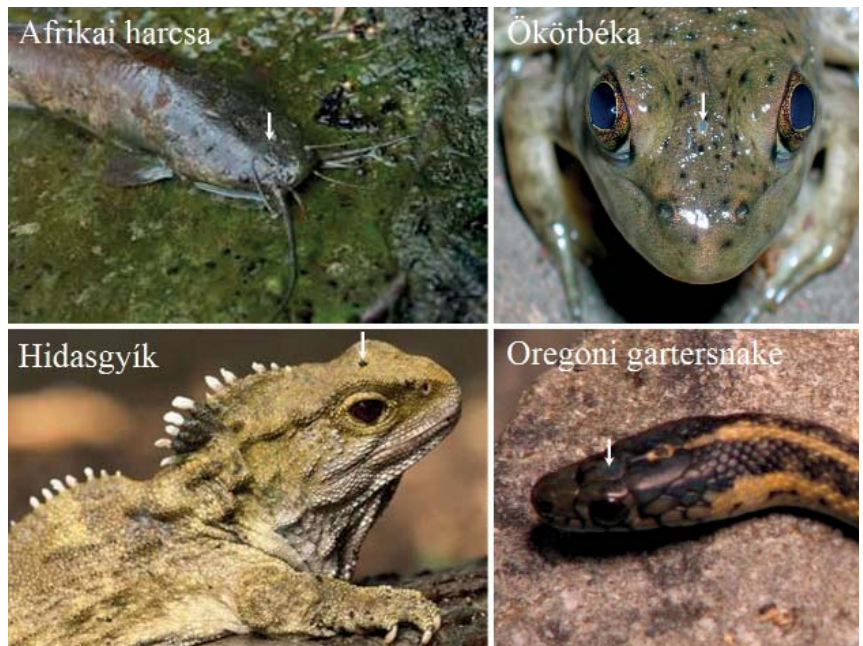
Fejtetői szem, mesteróra, tobozmirigy és melatonin

Az alacsonyabb rendű élőlények minden sejtjébe eljuthat a fény, és igazíthatja belső órájukat. Más a helyzet a magasabb rendű élőlényekben. Néhány hal, kételtű és sok hüllőfaj feje tetején jól látszik az ún. fejtetői (harmadik vagy parietális) szem, amellyel

fényt érzékelnek, hogy igazíthassák belső órájukat (5. ábra). A gerincesek sok fájában bár a fejtető elfedi a fejtetői szemet, ám az ott van, érzékeli az átjutó fényt és betölti szerepét.

A fejtetői szem felépítése meglehetősen hasonlít az „igazi” szemére: van lencséje, üvegteste, vannak benne fényérzékkelő sejtek és pigmentsejtek is (6. ábra). A fényérzékkelő sejtekből egy ideg vezet az ún. tobozmirigybe, és szabályozza annak hormonszintetizáló és -kiválasztó aktivitását. A fejtetői szem és a tobozmirigy az epitalamusz része. Az epitalamusz a talamusz, a hipotalamusz és az agyalapi miriggyel egyetemben a köztiagyat alkotja (7. ábra). Emberben a tobozmirigy rizsszem nagyságú, tobozalakú, vöröses-szürke színű belső elválasztású mirigy, a melatonin forrása. A tobozmirigy befolyásolja az agyalapi-, a hasnyál-, a mellékpajzs-, az ivarmirigyek, valamint a mellékvesék aktivitását. A hipotalamuszról pedig közismert, hogy az ideg és az endokrin rendszer működését integrálja, és alapvető szerepet játszik a szervezetek belső környezetének fenntartásában, a külső életfeltételekhez történő igazításában. Szabályozza a testhőmérsékletet, a táplálék- és vízfelvételt, a szexuális viselkedést, és az érzelmi életet is.

A magasabb rendű élőlényekben, amint az emberben is, a szemben vannak azok a fényérzékkelő sejtek, amelyek a belső órát igazítják. A retina ganglionsejtjeinek némelyike melanopszint tartalmaz, a fényérzékeny opszin fehérjék egyikét (7. ábra). Ezek a ganglionsejtek a látóidegen át jelet küldenek azokba az idegsejtekbe, amelyek a

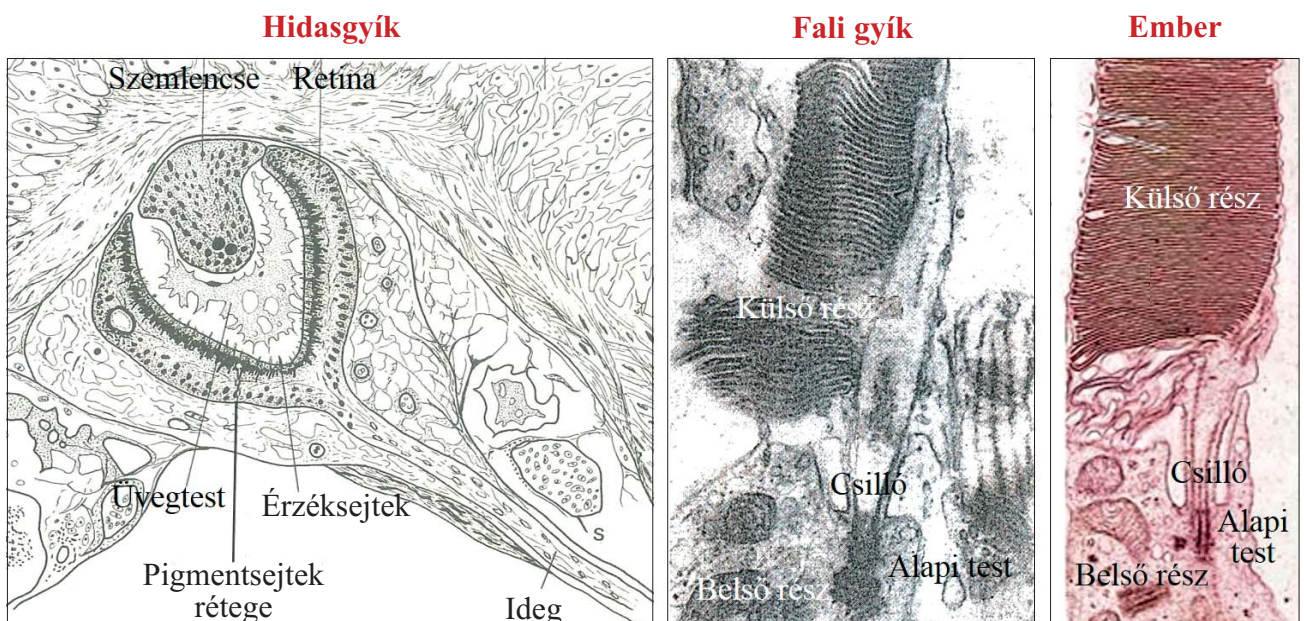


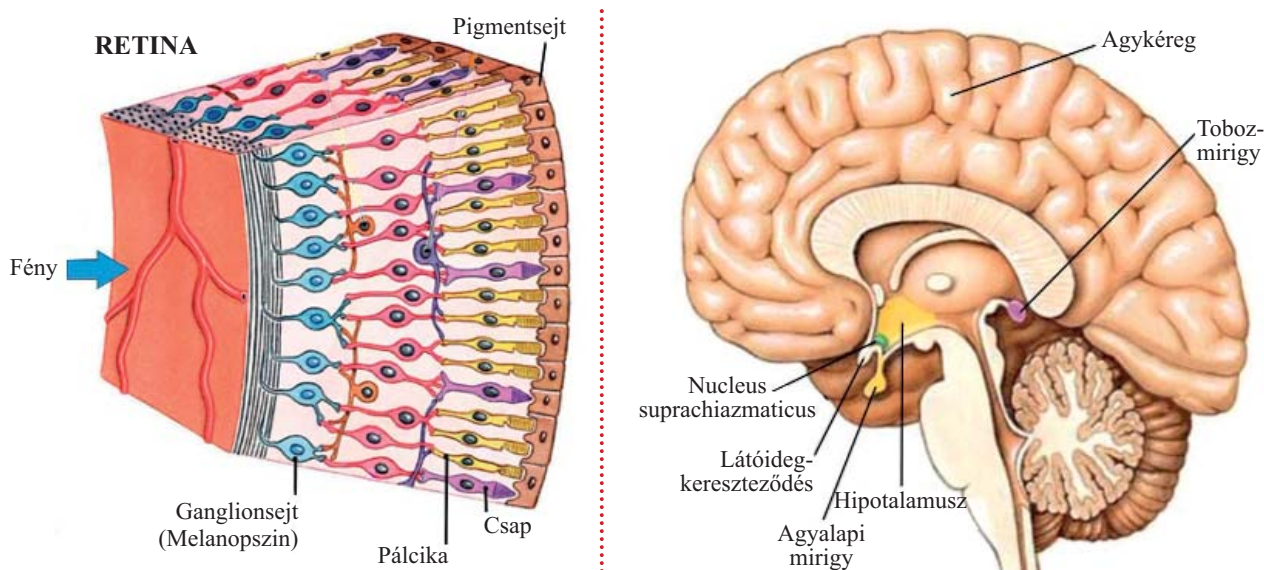
5. ábra. Az afrikai harcsa (*Clarias gariepinus*), az ökörbéka (*Lithobates catesbeianus*), a hidasgyík (*Sphenodon punctatus*) és egy kígyófaj (*Thamnophis atratus hydrophilus*) fejtetői szeme (↓)

két nucleus suprachiasmaticust alkotják, két olyan ún. magot a látóideg-keresztvezetési felett a központi idegrendszerben, amelyekben egyenként kb. húszezer idegsejt van. Nos, a belső óránk a nucleus suprachiasmaticusokban ketyeg. Mesterórának is szokták nevezni. A nucleus suprachiasmaticusok jelentőségét mi sem mutatja jobban, mint az a tény, hogy elroncsolásuk után meg-

szűnik az élőlények jellegzetes ébrenlét/alvás ritmusa. A legtöbb világtalan ember-társainkban ugyan funkcionálnak a nucleus suprachiasmaticusok, és bennük a belső óra, ám minthogy funkcióját a fény nem igazíthatja a nappalok-éjszakák váltakozásának megfelelően, napi ritmusuk 24,5 óra. (Mint azoknak az embertársainknak, akik napokon át sötétben élnek életüket.) Ez azt

6. ábra. A hidasgyík fejtetői szemének metszete, a fali gyík (*Lacerta muralis*) és az ember pálcikasejtjének szerkezete. A hidasgyík fejtetői szemének lényegében ugyanazok az alkotói, mint a gerincesek képlátó szemeinek. A pálcikasejtek felépítése kísértetiesen hasonló a fali gyík fejtetői szemében (Vigh Béla munkája) és az emberi szemben





7. ábra. A retina egy szeletének, valamint az emberi agy egy metszetének sematikus ábrái

jelenti, hogy a világtalan emberek napi ritmusa a látókéhoz képest naponta félóránnyal eltolódik, aminek gyakorta vannak kellemetlen következményei.

A tobozmirigyhez sok hiedelem kapcsolódott. Például René Descartes (1596–1650) francia filozófus és természettudós úgy vélte, hogy a tobozmirigy a lélek székhelye. Néhány nép kultúrájában az orr fölött a homlokra festett pötty, vagy odaragasztott kis ékszer (pottu, bindi) a harmadik szemet jelképezi, és spirituális jelentőségű szimbólum. Ma már ismert, hogy a tobozmirigy a belső elválasztású mirigyek egyike. Funkcióját azok az idegek szabályozzák, amelyek a mesterórát tartalmazó suprachiasmaticus nucleusokból erednek, és a fényviszonyoknak megfelelően hangolják a tobozmirigy tevékenységét. Különös, hogy a tobozmirigyben az életkor előre haladtával elmeszesedett rögöcskék (ún. agyhomok) szaporodnak fel. Sem a homok természete, sem pedig szerepe nem ismert.

A tobozmirigy terméke a melatonin, a trip-tofán aminosav egyik származéka. Koncentrációja éjjel magas, nappal alacsony (3. ábra). A melatonin a véráramba jutva szerveink – beleértve az agy – funkcióját a fény/sötét viszonyhoz igazítja. Biztos, hogy a melatonin felelős például a gyors időzónaváltással járó problémákért (jet lag). Ilyenkor a melatonin ciklus és az azt szabályozó sötétség/világosság ciklus nincs szinkronban. Következmény a rossz közérzet, fáradtság, csökkent teljesítőképesség. A megváltozott sötétség/világosság viszonyokhoz 5–6 nap múltán alkalmazkodik szervezetünk. Sok társunk megérzi és megismeri az évenkénti két óraátállítást is, és kételkedik azok értelmében. (A svájci gazdák teheneiket olyan „menetrend” szerint etetik, fejjük, amely nem követi az óraátállítást.

Azért, mert megtapasztalták, hogy az óraátállításhoz igazított fejések során csökken a tejhozam.) A megváltozott napi ritmus különösen az asztronauták, a pilóták, a légiutas-kísérők, a váltott műszakban, a bányák mélyén dolgozók szervezetét viseli meg. Ma már az is bizonyított, hogy az éjszakai világítás is hatással van az emberek, és sok más élőlény napi ritmusára. Ismert a fényterápia jótékony hatása, ami különösen a hosszú téli éjszakák időszakában segít depresszióra hajlamos embertársainkon. Idegsejtjeink pusztulása, funkciójuk csökkenése érthető a nucleus suprachiasmaticus sejtjeit, a belső óra funkcióját és a napi ritmust is. Vannak, akik azt gondolják, hogy a napközben és éjjel is kelő-fekvő időszak embertársaink különös szokása az „elromló” órával és/vagy tobozmirigyvel kapcsolatos. Rajtuk talán melatoninnal lehetne segíteni. Biztosra vehető, hogy a kóros elhízás sok emberben az összevissza napi ritmus következménye. A melatonin használatát például a juhtenyésztők is: tetszés szerint állíthatják be vele az ivarzás idejét.

A nucleus suprachiasmaticusokban keletkező mesteróra mellett léteznek ún. periférius órák is. A létükre az utal, hogy vannak olyan szerveink (bőr, csecsemőmirigy, hasnyálmirigy, lép, máj, mellékvese, nyelvcső, prosztata, tüdő), amelyekből az izolált sejtek aktivitása kb. 24 órás ciklusban változik. A periférius órákat a melatonin

szabályozza, amely hiányában önállóan irányítják a sejtek életét.

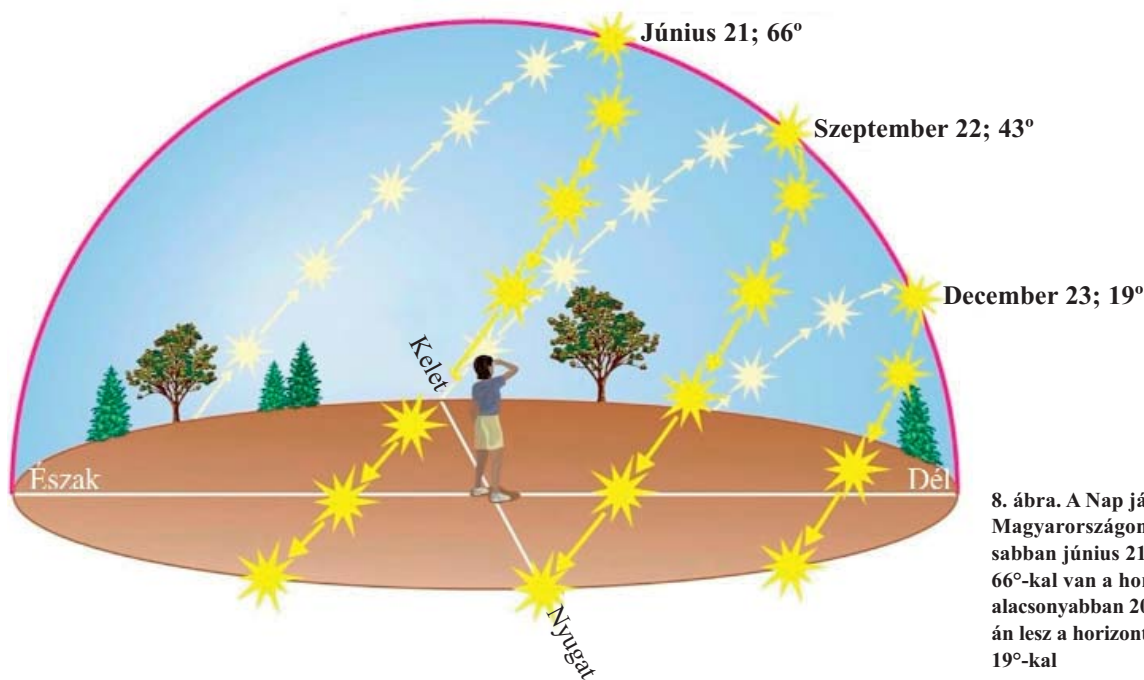
Bár sok mindent megtudtunk a belső óra és a napi ritmus rejtelméről, bőven vannak olyan jelenségek, amelyek módfelett érdekesek, és megismerésre várnak a velük kapcsolatos mechanizmusok. Mi szabályozza a vakondok, vagy az örök sötétségben élő csupasz és vak földikutya belső óráját, napi ritmusát? Miként szabályozott az éjjel aktív, nappal alvó élőlények „fordított” napi ritmusa? És a téli álmot alvóké? Különös, hogy az olyan sarkvidéki élőlényeknek, mint a hófajd és a rénszarvas, az éveknek abban a szakaszában van napi ritmusa, amelyben van napkelte és napnyugta. Ám nyaranta, az állandó napsütésben, és telente, a folyamatos sötétségben megszűnik napi ritmusuk. Vajon miként kapcsolják ki belső órájukat? Vajon működnek a periférius órák? A belső óra és a napi ritmus jelentőségére itt két példát említünk.

Miként találunk haza a galambok?

Az élőlényeknek az otthon nemcsak a megszokott környezet jelenti, hanem az is, hogy mikor kel fel és nyugszik le a Nap ott, ahol élnek. Ha postagalambokat pl. Győrből Salzburgba visznek, ahol 19 perccel később kel a fel Nap, mint otthonukban, szabadon eresz-

1. táblázat. Napkelte és napnyugta 2015 leghosszabb és legrövidebb nappalú napjain három, a 47. szélességi kör mentén fekvő városban

		Salzburg ←343 km→ Győr ←299 km→ Debrecen		
Napkelte és napnyugta	Június 21.	5:08 és 21:09	4:50 és 20:50	4:35 és 20:34
	December 23.	7:54 és 16:18	7:35 és 16:00	7:18 és 15:45



8. ábra. A Nap járása az égbolton. Magyarországon a Nap legmagasabban június 21-én delel, amikor 66°-kal van a horizont felett. Legalacsonyabban 2015. december 23-án lesz a horizont felett, mindössze 19°-kal

tésük után késedelem nélkül keletre indulnak, és repülnek addig, amíg ismerős környékre érve hazatalálnak (1. táblázat). Ha Debrecenbe viszik őket, ahol a győrinél 15 perccel korábban kel fel a Nap, a galambok nyugati irányba veszik útjukat. Hazatalálásuk alapja a belső órájuk, amely nemcsak azt „mondja meg” nekik, hogy nincsenek otthon, hanem azt is, hogy otthonuktól nyugatra, vagy keletre van-e a hazafelé. A hazatalálásra tenyésztett postagalambok belső órája néhány másodperc pontos. A pontos belső óra fontos, hiszen a 47. szélességi kör környékén, ahol Salzburg, Győr és Debrecen is van, a napkelte csaknem 20 km/

perc sebességgel halad keletről nyugatra. Ha a postagalambok belső óráját pl. Győrben, zárt térben a debreceni napkeltehez, -nyugtához igazítják, és aztán Debrecenben engedik szabadon őket, nem repülnek vissza Győrbe. A belső órájuk ugyanis azt mondja, hogy otthon vannak. Kicsit zavarodottan egy helyi galambcsapathoz csatlakoznak...

Ha győri galambokat Kaposvároton engednek szabadon, észak felé veszik az irányt, és nem egészen két óra múltán hazaérkeznek. (A két város a 17° keleti hosszúsági kör mentén fekszik, légvonalban 148 km-re egymástól.) Honnan tudják a galambok, hogy

merre van az otthonuk, és hogy merre repüljenek? Nos, a galambok (és sok-sok más fajba tartozó élőlény) nemcsak a napkelte „jegyzik meg”, hanem követni tudják a Nap járását is az égbolton. „Tudják”, hogy a nap mely percében milyen magasan jár otthonuk környékén a Nap. Minél délebbre megyünk, a Nap annál magasabban jár az égbolton, és minél északabbra, annál alacsonyabban (8. ábra). Ha tehát az otthonuktól délre visznek és eresztenek szabadon galambokat, a Nap járása alapján észlelik új helyzetüket, és északra repülnek, otthonuk irányába.

A hazatalálás képessége a galamboknak, mint sok más fajnak is, velük született, genetikailag meghatározott, ösztönös képessége. Tájékozódásuk kétkomponensű. A kelet-nyugat irányút a napkelte, és a belső órájuk vezényli, az észak-délt pedig a Nap járása az égbolton. Mái ismeretlen, hogy a galambok, az élőlények tájékozódásában mely géneknek és mi a szerepe. Borult égbolt mellett, amikor nem láthatják a Napot, a galambok a Föld mágneses erővonalai alapján tájékozódnak és találnak haza. A mágneses erővonalak alapján a tájékozódás képessége azonban nem velük született. Otthon tanulják meg, felhős körülmények között repülve. Azok a galambok, amelyek otthon csak napos viszonyok között repültek, felhős égbolt alatt nem találnak haza.

A királylepkék vándorlása

A belső óra nemcsak jelzi a napkelte, hanem méri is a nappalok hosszát. Eme képessége különösen fontos azon fajok életé-

9. ábra. Királylepkék (*Danaus plexippus*)





10. ábra. A királylepkék vándorlási útvonalai

ben, amelyek évszakonként vándorolnak, vagy téli álmat alszanak. Példaként a királylepké (*Danaus plexippus*), az egyetlen vándorló rovarfaj estét említjük (9. ábra).

A főleg Észak-Amerikában élő lepkék viselkedése szeptember közepétől gyökeresen megváltozik: miután a nappalok átlagos hossza 11,3 óránál rövidebbé válik (és/vagy a napi átlagos hőmérséklet 20°C alá csökken), ahelyett, hogy ivarsejteket termelnének és szaporodnának, elkezdnek zsírt felhalmozni, és dél felé veszik útjukat (10. ábra). (A királylepkék belső órája a csápok végén levő kis dudorban van.) A termikeket kihasználva, az északi szelek szárnyán naponta akár 200 kilométert is megtesznek. A Sziklás-hegységtől keletre élő királylepkék egyike-másika akár négyezer kilométert is repül, mielőtt elérné azt a

néhány telőhelyet, amelyek Mexikóvárostól északnyugatra vannak, mintegy három méter magasan. Itt cédrus- és fenyőfákon függeszkedve tízmilliószám telnek át (9. ábra). (A Sziklás-hegységtől nyugatra élő királylepkék a Csendes-óceán partja mentén levő ligetekben telnek. A telőhelyeket megóvándó, a természetvédek felvásárolták az ottani földeket.) Márciustól, a nappalok hosszának növekedésével aztán párzanak, lerakják petéiket, és néhány hét után elpusztulnak. Utódaik kb. öt hét elteltével fejlődnek ki, és indulnak észak felé. Párzanak, utódokat nemzenek, és néhány hét múltán ők is elpusztulnak. Az áttelelők gyermekei, unokái, déd- és ükunokái észak felé terjedve apránként ismét meghódítják Észak-Amerikát. Ősszel aztán újrakezdődik a királylepkék csodálatos vándorlása.

Az élőlények egyik csodálatra méltó képessége, hogy alkalmazkodnak a nappalok és éjszakák váltakozásához. A kíváncsi és a tette kész emberek, valamint a tudomány érdeme, hogy megismertük a belső órát, és azt is, hogy miként szinkronizálja az élőlények napi ritmusát, teszi lehetővé tájékozódásukat, hogy élhetik életüket Földünkön. Az ismeretek birtokában nemcsak érdekes viselkedéseket érthetünk meg, hanem megoldásokat dolgozhatunk ki a napi ritmussal kapcsolatos bajainkra. Az áttekintés szerzője reméli, munkájával hozzájárult ahhoz, hogy olvasói szellemiükben gazdagodva értékelik a belső óra és a napi ritmus jelentőségét életünkben.

A Társadalmi Megújulás Operatív Program (TÁMOP) 4.1.1.C-13/1/KONV-2014-0001 támogatásával

A Fény Éve 2015 nemzetközi partnerei



KOZMA-BOGNÁR LÁSZLÓ

A növényi cirkadián óra beállítása fénnel

A cirkadián óra olyan általánosan elterjedt biokémiai mechanizmus, ami ritmikusan szabályoz számos különböző szintű biológiai folyamatot (génkifejeződés, enzimatis reakciók, fiziológiai folyamatok, viselkedés) szinte minden olyan élő szervezetben, ami a környezeti tényezők napszakos változásainak van kitéve. Az óra működése révén ezek a folyamatok napi ritmust mutatnak, kb. 24 órás periódushosszal. Az óra legfontosabb biológiai funkciója az életműködések időbeli „szervezése”. A környezeti tényezők jelentősen megváltoznak a nap során, amelyekhez az élőlénynek folyamatosan alkalmazkodnia kell. Ez különösen igaz a helyváltoztatásra képtelen növényekre. Az óra olyan módon segíti a „gazdaságos” alkalmazkodást, hogy egyes folyamatokat azokra a napszakokra időzít, amikor várhatóan szükség lesz rájuk. Ez nem egyszerű inger → válasz jellegű szabályozást jelent: az óra éppen attól óra, hogy képes az idő mérésére, ezáltal pedig az egyes napszakokhoz kapcsolódó változások (nappal, éjszaka) bekövetkezésének az előrejelzésére. Az egyik leggyakrabban említett példa a fotoszintetikus apparátus fehérjekomponenseinek, például a CAB2-nek (Chlorophyll a/b-binding protein 2) a termelődése. A CAB2 gén fényindukált, ami érthető, mivel a CAB2 fehérjére, mint a fénybegyűjtő antenna-komplex egyik strukturális komponensére akkor van leginkább szükség, amikor fény éri a növényeket. Éjszaka a CAB2 szintézise leáll, ami az erőforrások gazdaságos elosztásának fogható fel. Mindezek mellett azonban a CAB2 gén működését a cirkadián óra is szabályozza. Ennek eredményeként a CAB2-transzkripció már az éjszaka vége felé (tehát még sötétben) bekapcsolódik, és mire felkel a Nap, már jelentős mennyiségű CAB2-protein termelődik és a rendszer készen áll a fényenergia azonnali hasznosítására. Ha a CAB2 gén működését csak a fény szabályozná, akkor a fény megjelenése után óráknak kellene eltelnie ahhoz, hogy megfelelő mennyiségű CAB2-protein termelődjön, ami a fotoszintézis alacsonyabb hatásfokához vezetne a reggeli órákban. Fontos megemlíteni, hogy a cirkadián óra akkor is „ketyeg”, ha megszüntetjük a nappalok és az éjszakák váltakozá-

sát, vagyis ha a növényeket állandó fénybe vagy állandó sötétbe helyezzük. Ezért hiába van jelen a fény állandóan, a CAB2 gén kifejeződése (és a fotoszintézis hatékonysága) továbbra is ritmikus marad, hasonlóan ahhoz az állapothoz, amikor a növények fény/sötét ciklusokon voltak. Állandó sötétben is hasonló a helyzet, de fény hiányában a CAB2 gén alapaktivitása néhány nap alatt a nulla szintre esik le, így gyakorlatilag nem termelődik CAB2-fehérje. A CAB2 csak egy jól ismert példa; a cirkadián óra a fotoszintetikus apparátus számos egyéb komponensének a termelődését is szabályozza.

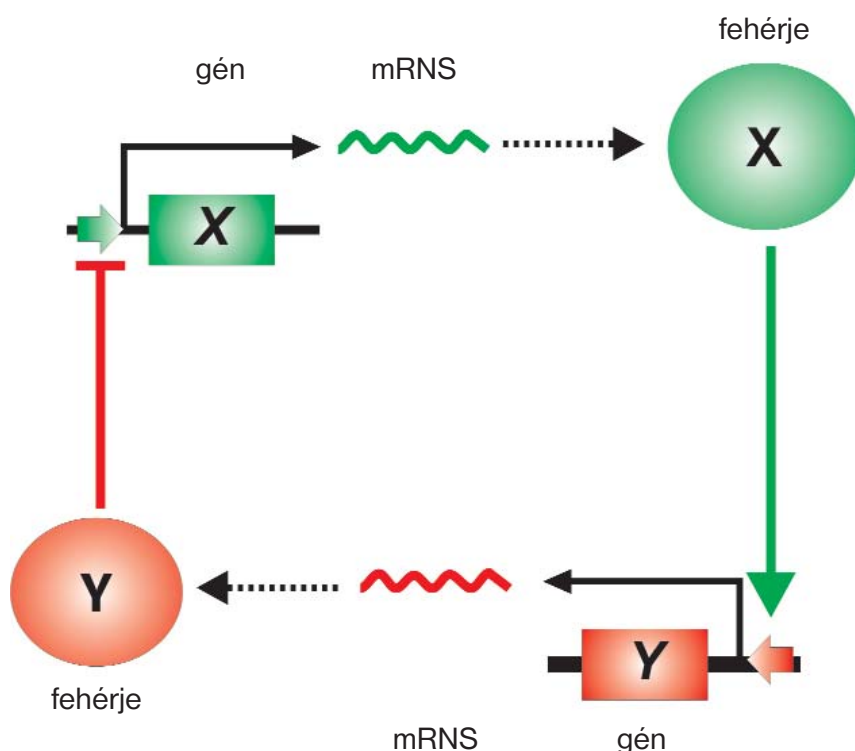
Felmerülhet tehát a kérdés, hogy tényleg fontos-e ez a kifinomult szabályozás a növények életében és nem lenne-e elég az egyszerű, közvetlen fényszabályozás? Erre a kérdésre egyértelmű választ adott egy ötletes kísérlet eredménye, amelynek során vad típusú és két különböző cirkadián-mutáns növény biomassza-termelését vizsgálták. A mutáns növényekben semmi más nem változott meg a mutációk következtében, csak a cirkadián óra által generált ritmusok periódushossza. A vad típusú (WT) növényekben ez a periódushossz 24 óra volt, a „rövid periódusú” mutánsban (SP) 20 óra, a „hosszú periódusúban” (LP) pedig 28 óra. Mindhárom növényt három különböző körülmény mellett nevelték 4 héttig: T24 (12 óra fény–12 óra sötét), T20 (10 óra fény–10 óra sötét) és T28 (14 óra fény–14 óra sötét). Minden növény minden körülmény mellett ugyanannyi fényt kapott a 4 hét során: összességében 2 hétig voltak fényben és 2 hétig sötétben. A 4 hét eltelte után meghatározták a létrehozott biomassza mennyiségét, amiből egyértelművé vált, hogy az adott növény olyan körülmény mellett nőtt a legjobban, ahol a belső órájának a periódushossza megegyezett a külső körülmények váltakozásának periódushosszával (WT → T24, SP → T20, LP → T28). A különbség esetenként több mint szembe-tűnő volt: T20 alatt az SP növények 50%-kal több biomasszát produkáltak, mint a WT növények; T24 alatt viszont 30%-kal kevesebbet. Ez annak a következménye volt, hogy a belső és külső periódushossz összhangjának elvesztése miatt a cirkadián ritmusok időzítése megváltozott (rossz időben fejeződtek ki egyes gének), ami aztán

a fotoszintézis hatékonyságának csökkenéséhez vezetett.

A cirkadián óra „lelke” az ún. központi *oszcillátor*, amelyet az óragének és az általuk kódolt óraféhrjék építenek fel. Eukarióta szervezetekben az oszcillátor működésének alapja az óragének és az óraféhrjék között megvalósuló negatív visszacsatolási mechanizmus. Az oszcillátor leg-egyszerűbb elméleti modellje (1. ábra) egyetlen szabályozó hurokból áll, amelyet két komponens (X, Y) alkot. Az X gén által kódolt X-fehérje serkenti az Y gén működését, így az Y-fehérje termelődését; az Y-fehérje viszont gátolja az X gén működését. E reguláció révén alakul ki egy alaposzcilláció az X- és Y-komponensek mennyiségében: magas X-szinthez alacsony Y-szint társul (és viszont). Az alaposzcilláció periódushosszát számos tényező befolyásolhatja, amelyek közül a legfontosabbak az X-, Y-mRNS és a fehérjemolekulák stabilitása, vagy az X-, Y-fehérjék sejtmagi importja. A valós rendszerek természetesen kettőnél jóval több komponenset tartalmaznak, de ugyanezek a regulációs mechanizmusokon alapulnak.

A cirkadián óra csak akkor lehet igazán hasznos az élőlény számára, ha a környezettel összhangban működik, vagyis az óra által prediktált napszak (szubjektív idő) megfelel a külső valós (objektív) időnek. Mivel a cirkadián órák periódushossza soha nem pontosan 24 óra, a külső környezettel való összhang fenntartása érdekében folyamatosan be kell állítani. Ez az ún. *bemeneti* oldal révén valósul meg, természetes körülmények között minden nap. A legfontosabb beállító tényezők a fény és a hőmérséklet (pontosabban ezek napszakos változásai). A fényt speciális fotoreceptorok kötik meg, abszorbeálják, majd a jelet az oszcillátorhoz továbbítják. A jel az oszcillátor fázisának olyan mértékű és irányú áttárlását okozza, hogy az óra szinkronba kerül a külső idővel. Az oszcillátor fázisa általi módosul, hogy a bejövő (fény)jel hatására az oszcillátor egyik (vagy több) komponensének a mennyisége vagy aktivitása megváltozik.

Az óra másik „karja” az ún. *kimeneti* oldal, amelyen keresztül az oszcillátor által létrehozott ritmikus jel elhagyja a rend-



1. ábra. A cirkadián oszcillátor legegyszerűbb elméleti modellje. Az X gén által kódolt X-fehérje serkenti az Y gén működését, míg az Y-fehérje gátolja az X gén kifejeződését. A négyzetek géneket, a hullámvonalak a génekről átíródó mRNS-molekulákat, az ellipszisek pedig a megfelelő fehérjéket szimbolizálják. A fekete folytonos, illetve szaggatott nyilak transzkripciót, transzlációt jelentenek. A zöld nyilak serkentő, a piros nyilak pedig gátló hatást mutatnak

szert. Az óra ezen keresztül fejt ki hatását a különböző cirkadiánregulált folyamatokra.

Cirkadián rendszer a magasabb rendű növényekben

A növényi cirkadián óra finomszerkezetét a molekuláris biológia modellnövényében, lúdfűben (*Arabidopsis thaliana*) vizsgálták és írták le részletesen. Az *oszcillátor* nagyszámú komponensből (génekből és az általuk kódolt fehérjékből) épül fel, ezek ismeretése messze meghaladná írásunk terjedelmi korlátait. Lényegesebbnek tartjuk hangsúlyozni, hogy a komponensek, amelyek egyébként három összekapcsolódó szabályozó hurokba szerveződnek, pozitívan vagy negatívan szabályozzák egymás kifejeződését; vagyis a növényi óra is az 1. ábrán vázolt törvényszerűségek szerint „ketyeg”. Az óra elsődleges *kimenete* valószínűleg a génkifejeződés szabályozása. A lúdfű génjei 25–30%-ának a kifejeződését szabályozza az óra. Ezen gének működésének összehangolt megváltoztatása áll a magasabb szintű (élettani) cirkadián ritmusok hátterében. Az óra működésének követésére is a génkifejeződés (transzkripció) vizsgálatát alkalmazzuk a leggyakrabban. Ehhez a

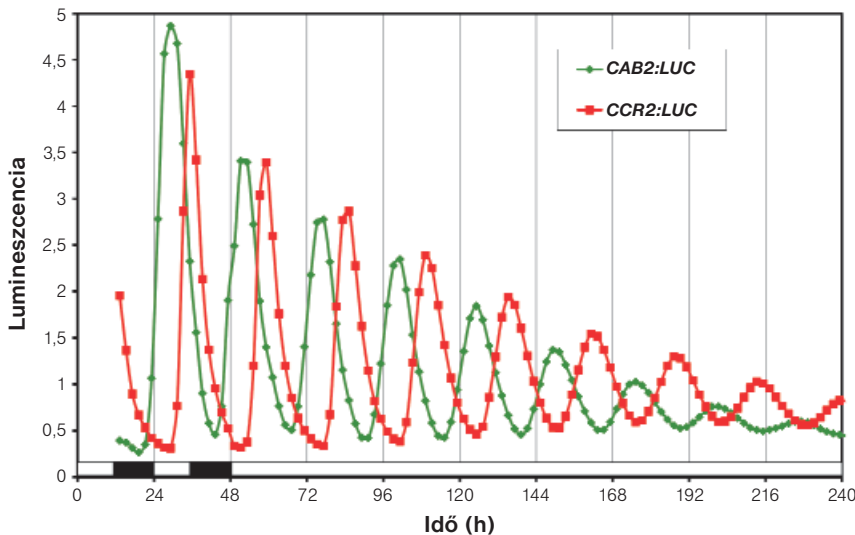
kiválasztott gének kifejeződését napokon (ideálisan egy hét) keresztül kell követni néhány órás felbontásban, ami meglehetősen kényelmetlen feladat, ha ez mintaszéledést, mRNS-izolálást, majd analízist jelent. Ezért használjuk inkább a *luciferáz* (*LUC*) riportergént a cirkadián génkifejeződés vizsgálatára. Első lépésben izoláljuk a növényből a kiválasztott gén (pl. *CAB2*) azon szakaszát, amely nem kódol fehérjét, viszont irányítja a gén működését. A géneknek ezt a bizonyos szakaszát promóternek nevezzük. A promótert génszabályozási eljárások segítségével összeépítjük a *LUC* gén azon részével, amely a luciferáz (*LUC*) enzimet kódolja. Ez eredményezi a *CAB2:LUC*-riportergén-konstrukciót, amelyet bejuttatunk a növényi genomba. Ennek eredménye lesz egy transzgenikus növény, amely valamelyik kromoszómába integrálva hordozza a *CAB2:LUC*-konstrukciót, mint egy új (mesterséges) gént. Ennek kifejeződését a *CAB2*-promóter szabályozza, ezért éppen úgy működik, mint az eredeti, endogén *CAB2* gén: vagyis ritmikusan. A konstrukció „terméke” a *LUC*-enzim, ezért ennek a mennyisége is ritmikusan változik. A *LUC*-fehérje mennyiségét a *LUC* enzimaktivitás *in vivo* meghatározásával mérjük: a növényeket egyszerűen lepermetezzük luciferinnel (az enzim szubsztrátjával), majd egy nagy

érzékenységu kamerával digitális képeket készítünk róluk (az expozíció ideje alatt természetesen abszolút sötét van). A *LUC*-enzimreakció fénykibocsátással jár, ezért a *LUC*-t kifejező transzgenikus növények valószínűleg világítanak. Ez a fény nagyon precízen mérhető a képek feldolgozásával. Tehát, ha a kapott fény mennyiség-adatokat az idő függvényében ábrázoljuk, akkor végső soron arról kapunk információt, hogy hogyan fejeződik ki a *CAB2* gén időben, ami pedig arra utal, hogy hogyan működik az óra.

A 2. ábra egy ilyen kísérlet eredményét mutatja. A növények 5 napig nevelkedtek 12 óra fény/12 óra sötét fénycikluson, majd lepermetezzük és a kamera alá helyezzük őket. A kamera 2 óránként készített egy felvételt, amelyeket a kísérlet végén kiértékelünk (megmértük a fénykibocsátás mértékét), majd ábrázoltuk az értékeket az idő függvényében. Az első két nap megtartottuk a fény/sötét szakaszok váltakozását, majd a 3. naptól kezdve a növények állandó fényben voltak. A kísérletben egy másik riporterkonstrukciót is használtunk, amely a *CCR2:LUC* névre hallgat. Jól látható, hogy a *CAB2:LUC* a nap első felében, míg a *CCR2:LUC* este fejeződik ki a legmagasabb szinten (vagyis eltérő fázisban ritmizálódnak). Az ábra a cirkadián ritmusok egyik leglátványosabb tulajdonságát szemlélteti: állandó körülmények között is fennmaradnak. Az is látszik, hogy a szabadon futás megkezdése után a görbék csúcsa fokozatosan eltolódik, ami annak a következménye, hogy a szabadon futó periódushossz kicsit több mint 24 óra. Ha pontosan 24 óra lenne, akkor a *CCR2:LUC* 172 óra körül kifejeződési csúcsot mutatna. Valójában a kb. 25,5 óra periódushossznak köszönhetően itt egy minimum látható.

A növények leggyakrabban vizsgált cirkadián élettani működése a csiránövények leveleinek függőleges irányú mozgása. Napról a levelek csaknem vízszintesen helyezkednek el, a két egymással szembe levő levél lemezének síkja tompaszöget zár be. Éjszaka a levelek felfelé mozdulnak el, a levéllemezek által bezárt szög erősen csökken. Ez a ritmikus működés állandó körülmények között is megmarad, bizonyítva, hogy a cirkadián óra szabályozza. Ha a bezárt szöget az idő függvényében ábrázoljuk, hasonló ritmikus görbét kapunk, mint pl. a *CAB2:LUC*-riporter mérése esetén. A módszer nem annyira pontos, mint a luciferáz mérése, viszont nem előfeltétele a transzgenikus növények előállítása.

Az óra beállítása, vagyis a külső, valós időhöz történő szinkronizálása a *bemeneti* oldal feladata. Az óra fázisa fény/sötét és/vagy hőmérsékletciklusokkal állítható be. A hőmérsékletérzékelés mechanizmusáról nagyon keveset tudunk, viszont ismert, hogy a beállításban hatásozó fény elsődleges érzékelésében a fitokróm és a kriptokróm fény-



2. ábra. Egy luciferázmérés eredménye. A *CAB2:LUC*-, illetve *CCR2:LUC*-riporter-konstrukciókat hordozó transzgenikus növényeket 5 napig neveltük 12 óra fény/12 óra sötét fényperiódusokon, majd luciferinnel kezeltük és a kamera alá helyeztük őket. A mérés első két napján a fény/sötét szakaszok továbbra is váltották egymást, majd a 3. naptól kezdve (48 órától) a növények állandó fényben voltak. A mérés során uralkodó fényviszonyokat fehér (fény) vagy fekete (sötét) sávok mutatják a grafikon alján

receptorok vesznek részt. A fitokrómok vörös (660 nm) vagy távoli vörös (730 nm) fény elnyelésére képesek, és egyfajta molekuláris kapcsolóként működnek: vörös fény hatására ún. aktív térszerkezetet vesznek fel, amely távoli vörössel besugározva visszaalakul az inaktív formába. Az inaktív fitokrómok a citoplazmában találhatók, de besugárzás után a sejtmagba vándorolnak, ahol fehérjekomplexek kialakításában vesznek részt. Ezek a komplexek közvetve, de közvetlenül is részt vehetnek a fény szabályozott gének kifejeződésének irányításában. A fitokrómok által a sejtmagba továbbított fényjel két fontos rendszert vagy folyamatot is szabályoz. Az egyik az ún. fotomorfogenezis, ami alatt a növények fényben történő fejlődését értjük. A növények megjelenése, kinézete nagyon különböző, ha sötétben vagy fényben nevelkednek. Az egyik legszembetűnőbb különbség a növények szárának hossza. Ez sötétben erősen megnyúlt, fényben pedig rövid; vagyis a fény gátolja a növények megnyúlását. A fitokrómoknak fontos szerepe van ennek a válasznak a kialakításában. A fitokrómok hiányában a csíranövények nem látják a vörös fényt és ugyanolyan hosszú szárat növesztenek, mint ha sötétben lettek volna. Világos tehát, hogy a fitokróm fehérjekomplexek szabályozzák számos olyan gén működését, amelyek terméke szükséges a fotomorfogenezishez. A másik fontos fitokróm-regulált rendszer a cirkadián óra, amelynek a fénybemenetét biztosítják ezek a receptorok, bár ennek molekuláris részletei még nem teljesen tisztázottak. A fény beállító hatásának alapja általában valamely órákomponens(ek) meny-

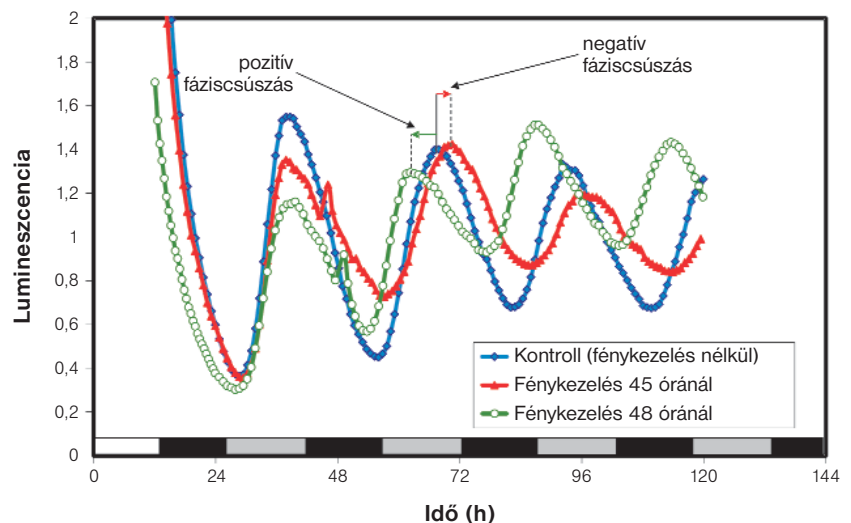
nyiségének megváltoztatása. Gombákban és emlősökben a fény egy-egy órágán kifejeződését indukálja és így fejt ki hatását az óra működésére. Rovarokban az egyik órafehérje gyors lebontásán alapul a fény beállító hatása. Eddigi ismereteink alapján a növényi rendszer a beállítás molekuláris mechanizmusa tekintetében a gomba- és az emlősrendszerekhez hasonlít. Számos nö-

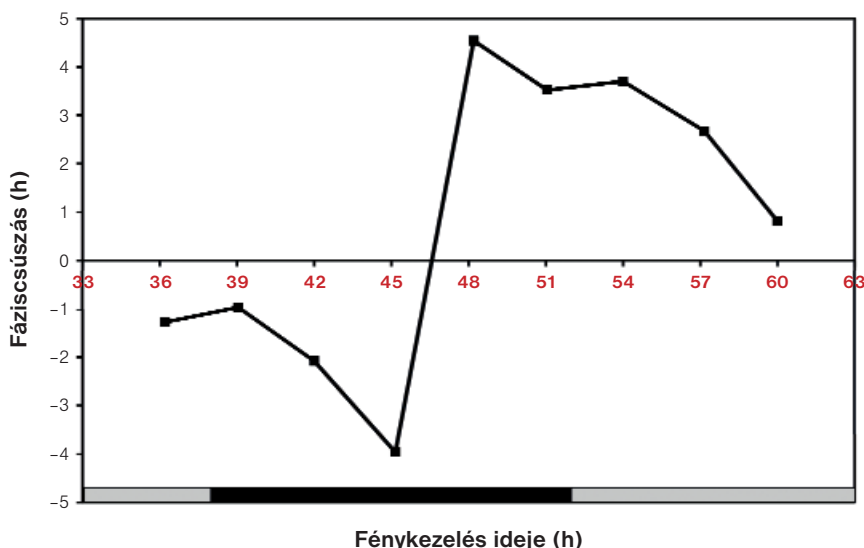
vényi órágán kifejeződését szabályozza a fény, és több esetben szoros összefüggést mutattak ki egyes órágének fényindukciója és az óra fény általi beállítása között.

Hogyan mérjük, vizsgáljuk az óra beállítását?

A fénybemenet több, különbözőnek tűnő (vagy inkább csak különbözőképpen mérhető) hatást fejt ki az oszcillátorra, attól függően, hogy milyen körülmények között vizsgáljuk a rendszert. Az egyik módszer az oszcillátor rövid fényimpulzusokra adott válaszában a vizsgálata. Ilyenkor a rendszer szabadon fut sötétben, majd a növények különböző csoportjait különböző időpontokban rövid időre megvilágítjuk. A megvilágítás hatására a szabadon futó ritmus fázisa megváltozik (elcsúszik) a nem megvilágított kontrollnövények fázisához képest. A fázisváltozás mértéke és iránya (korábbra vagy későbbre csúszik) függ attól, hogy milyen időben adtuk a fénykezelést. Ezt a fajta beállítást *nem-parametrikus* beállításnak nevezzük. A 3. ábra konkrét példákat mutat a fényindukált fáziseltolódások mérésére. A kísérletben *CCR2:LUC*-növények három csoportját használtuk. A növényeket fény/sötét ciklusokon való nevelés után állandó sötétbe helyeztük és mértük a luciferáz-aktivitást. A 0 óra időpont az utolsó nevelési nap hajnalának (sötét → fény átmenet) felel meg. Látható, hogy a kifejeződés első csúcsa kb. azonos időben jelentkezik mindhárom csoport esetében. Ezt követően az egyik csoportot 45 órákor, a másikat

3. ábra. Fényindukált fáziseltolódások. A *CCR2:LUC* kifejeződését mértük folyamatos sötétben szabadon futó növények három elkülönített csoportjában. Két csoport a jelzett időpontokban rövid fénykezelést kapott, a harmadik csoport kontrollként szolgált. A piros nyílhegy a negatív, a zöld nyílhegy a pozitív fáziseltolódásra hívja fel a figyelmet. A grafikon alsó részén látható sávok az aktuális fényviszonyokat jelzik. A fehér fényt, a fekete sötétet jelent. A szürke sávok az ún. szubjektív nappalt jelzik: ezek azok az időszakok, mikor az óra által jelzett belső idő szerint nappal, de ténylegesen sötét van





4. ábra. Fénykezelések fázisválasz görbéje. A 3. ábrán látható kísérletet megismételtük, de a fénykezeléseket több időpontban alkalmaztuk, 3 óránként. A fáziscsúszásokat megmértük, és ábrázoltuk a fénykezelés időpontjának függvényében. A fáziskésést negatív, a sietést pedig pozitív értékek jelzik. A grafikon alján látható sávok a szubjektív napszakot jelzik. Szürke: szubjektív nappal, fekete: szubjektív éjszaka

48 órakor megvilágítottuk 30 percre, míg a harmadik csoport nem kapott fénykezelést. A besugárzás fáziscsúszást indukált: 45 óránál a ritmus későbbre tolódott, amit negatív fáziscsúszásnak (vagy késésnek) nevezünk, míg 48 óránál a ritmus korábbra tolódott, amit pozitív fáziscsúszásnak (vagy sietésnek) nevezünk. A három növénycsoport ritmusa között kialakult különbség a mérés további részében is megmaradt. Ez bizonyítja, hogy nem a *CCR2:LUC*-riporter egyszeri fényre adott választ látjuk, hanem a riportert szabályozó oszcillátor fázisának átállítását. A fáziscsúszás mértéke a csúcsok időpontjainak mérésével könnyen kiszámolható.

A kísérletet több növénycsoport bevonásával megismételtük: összesen kilenc időpontban alkalmaztunk fénykezelést. Minden esetben megmértük az indukált fáziscsúszás mértékét és az irányának megfelelő előjellel láttuk el. A kapott értékeket ábrázoltuk a fénykezelés időpontjának függvényében, ami a 4. ábrán látható ún. fázisválasz-görbét (FVG) eredményezte. Az FVG az óra fényérzékenységet írja le, megmutatja, hogy az oszcillátor milyen fázisban milyen választ ad egy rövid fényimpulzusra. Látható, hogy ez a válasz nagymértékben függ attól, hogy mikor adjuk a fénykezelést. A legnagyobb fáziscsúszások a szubjektív éjszaka második felében tapasztalhatók. A maximális negatív csúszás a szubjektív éjszaka közepén váltható ki, de a néhány órával később adott fénykezelés már maximális pozitív csúszást okoz. E két jellegzetes időpont között található valahol a fáziscsúszás előjelváltásának idő-

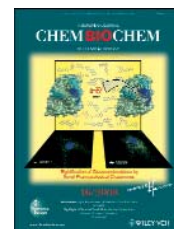
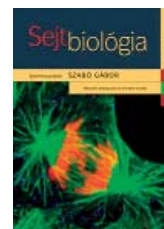
pontja, amit átcsapási pontnak is nevezünk. Az FVG alakja az oszcillátor, és nem az adott cirkadián ritmus fényválaszát írja le. A *CCR2* helyett használhatnánk akár más cirkadián óra által szabályozott gén promóterét a *LUC*-riporter-konstrukcióban: az FVG alakja mindig így nézne ki. Sőt, az FVG alakja különböző szervezetek tekintetében is konzervált: a muslica vagy az egéroszcillátor is ilyen jellegű fázisválaszokat mutat rövid fényimpulzusokra. Ez utóbbi esetekben az FVG alakja (késés a szubjektív éjszaka első felében, majd sietés a második felében) jól magyarázható az egyes órákomponensek fényindukált változásával.

A fénybemenet másik hatását állandó fényben tanulmányozhatjuk. Növényekben a szabadon futó periódushossz fordítottan arányos a fényintenzitással. Minél erősebb a fény, annál rövidebb lesz a periódushossz. Ezt a választ nevezzük *parametrikus beállításnak*. Egyes vélemények szerint a két típusú beállítás ugyanazon a mechanizmuson alapszik, a köztük lévő látszólagos különbséget az eltérő vizsgálati körülmények okozzák. Kísérleti adatokkal még nem sikerült megerősíteni vagy cáfolni ezeket az elképzeléseket. Mindenesetre, az óra stabil beállításához mindkét típusú beállítás hozzájárul természetes körülmények mellett. Stabil beállítás alatt azt az állapotot értjük, amikor a cirkadián ritmus fázisának viszonya a külső időhöz képest azonos az egymást követő fény/sötét ciklusok során (pl. a *CCR2:LUC* maximuma mindig este, a fény → sötét átmenetkor tapasztalható). Hogyan alakul ki ez a stabil fázis? A nap során az óra változó sebességgel működik. Nap-

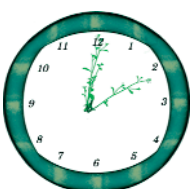
pal kicsit gyorsabban a fény miatt, éjszaka kicsit lassabban a sötét miatt. Ezek eredője a teljes napra vetítve általában 24 óránál kicsit hosszabb periódust eredményez. Ez azt jelenti, hogy a következő nap reggelére az óra kicsit lemarad a valós külső időhöz képest és 1–2 órás különbség alakul ki a szubjektív hajnal és az objektív hajnal (ez utóbbi a fény bekapcsolását jelenti) között. A hajnali sötét → fény átmenet megfelel egy nem-parametrikus beállító jelnek, ami (ahogy az FVG is mutatja) pozitív fáziscsúszást okoz. A stabil beállítás akkor valósul meg, mikor ennek a pozitív fáziscsúszásnak a mértéke pontosan megegyezik az óra periódushossza és 24 óra különbségével. Más szavakkal és általánosan: az lesz az oszcillátor stabil fázisa az adott fény/sötét ciklus során, amely esetén a hajnali fényjel olyan fázisban éri az oszcillátort, hogy a kiváltott fáziscsúszás pontosan kompenzálja az óra és a környezet periódushossza közti különbséget. A rendszer kis különbségek kompenzációjában hatékony igazán, mivel az óra periódushossza mindig csak pár órával tér el 24 órától. Mesterséges körülmények között viszont nehéz helyzet elé állíthatjuk az órát, ha pl. egy fény/sötét ciklust megfordítunk (...fény/sötét/fény/sötét/sötét/fény/sötét/fény...). A két sötét periódus után érkező fényjel által okozott fáziscsúszás nem elegendő a szinkron helyreállításához, hiszen ehhez mintegy félnapos csúszásra lenne szükség. Ezért az oszcillátor első napon kialakuló fázisa még nem lesz stabil, fokozatosan igazítódik a következő napokban. Egy ilyen szélsőséges esetben az új stabil fázis kialakulása mintegy három teljes ciklust igényel.

Irodalom

Kozma-Bognár L., Nagy F.: *Napi ritmusok: az idő, mint jel*. In: Szabó G. *Sejtbiológia* 822 o. Medicina Könyvkiadó, Budapest, 2009. 460–473. o. (ISBN: 978-963-226-189-8)



Kozma-Bognár L., Káldi K.: *Synchronization of the fungal and the plant circadian clock by light*. *ChemBiochem*, 2008 9(16):2565–73.



Greenham K., McClung CR.: *Integrating circadian dynamics with physiological processes in plants*. *Nature Reviews Genetics*. 2015 16(10):598–610.
Hsu PY, Harmer SL.: *Wheels within wheels: the plant circadian system*. *Trends in Plant Science*, 2014 19(4): 240–249.

ANDRÁSFALVY BERTALAN

Nanokristályok színekavalkádja

Világító pipettahegy

A minket körülvevő, nap mint nap megtapasztalt világ megismeréséhez elengedhetetlen a fény, ahogy maga a világ szó is a világozságból ered. A fény mint jelenség, mindig is csodálattal töltötte el az emberiséget, s központi szerepet töltött be a vallások és a mitológiák világában. A fény mint részecske vagy mint hullám, sokáig tudományos viták tárgya volt. Az elektromágneses sugárzás gondolatát *Michael Faraday* vetette fel 1847-ben.

A XX. század elején megfogalmazódó kvantummechanika magyarázattal szolgált – többek közt – a részecske-hullám kettősség jelenségére, amit fontos mérőföldkönek tekinthetünk az elektromágneses sugárzások megértésében és kutatásokban való felhasználásában. Bevezetőként hadd említsek néhány fontos lépést, amelyek elengedhetetlenül szükségesek a napjainkban széles körben használt két-fotonos fluoreszcens mikroszkópok megalkotásához.

Albert Einstein egy 1917-ben megjelent munkája fekteti le a ma ismert lézerek elméleti alapjait. 1928-ban *Rudolf W. Ladenburg* kísérletileg bizonyítja az *Einstein* által feltételezett jelenséget, majd 32 évvel később megszületik az első működő lézer *Theodore H. Maiman* laboratóriumában. A lézer koherens fény, vagyis a kibocsátott hullámok fázisa a sugár minden keresztmetszeténél azonos (azonos fázisban vannak), valamint egyszínű, azaz közel egy hullámhosszból áll. Ezen főbb tulajdonságainak további következménye, hogy kis szétartású a fénynyaláb és nagy energiát koncentrálni tud.

1931-ben *Maria Goeppert Mayer* doktori tézisében fejti ki a két-foton abszorpció elméletét, amit csak 30 évvel később, a lézerek megalkotásával igazolnak kísérletileg is. Ennek a jelenségnek a lényege, hogy ha a fluoreszcens anyag gerjesztése két alacsony energiájú foton egy időben való becsapódásával történik, akkor a kibocsátott fluoreszcens foton energiája meghaladja a gerjesztéshez használt egyes fotonokét. Mivel az egyidejű becsapódás esélye nagyon kicsi, ezért femtoszekundumos fotoncsomagok kibocsátására képesek lézerek szükségesek, melyekkel nagy sűrűségű gerjesztő foton érhető el. A nagy térbeli felbontás mellett a két-foton jelenség mikroszkópoknál való alkalmazásának másik fő oka az,

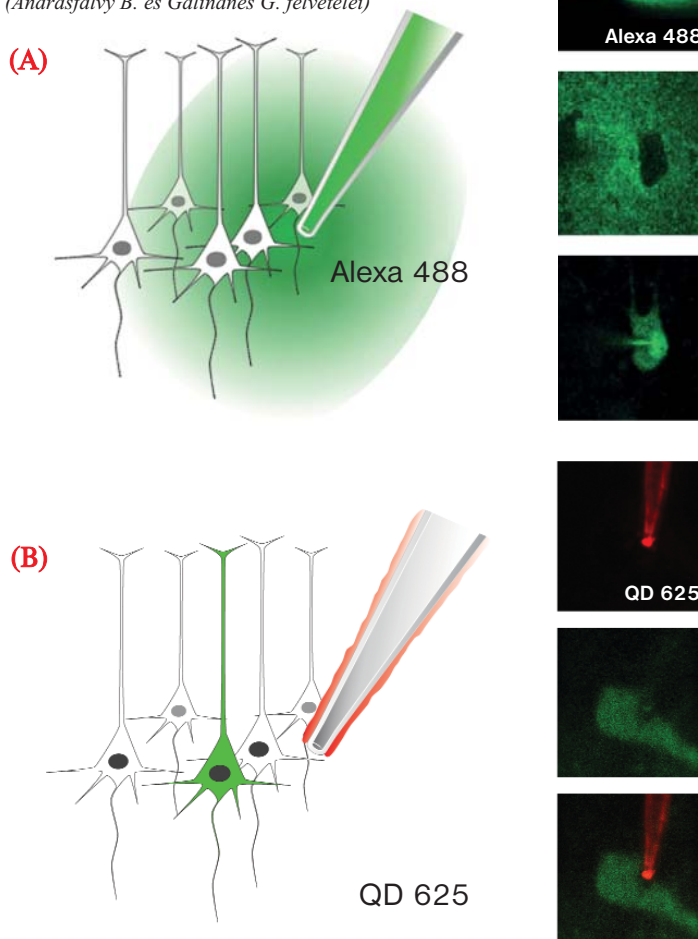
hogy a nagy hullámhosszú (~700–1000 nm) fotonok térbeli szóródása kisebb, mint a kisebb hullámhosszú, egy-fotonos gerjesztéshez használt fénynek. A legtöbb fluoreszcens festék excitációs spektruma alkalmas a két-foton gerjesztésre ebben a hullámhossztartományban.

A '90-es évek elején szabadalmaztatott két-fotonos mikroszkóprendszer forradalmasította az élő szövetek képalkotási módszerét azzal, hogy szubmikrométeres képalkotást tett lehetővé, akár 1 mm-es szövetmélységben is. Ezen eljárás, és a vele egy

időben robbanásszerűen fejlődő kémiai és molekuláris genetikai eljárások olyan fluoreszcens festékek és fehérjék létrehozását tették lehetővé, amelyekkel a kívánt sejtek, vagy sejtalkotó elemek akár több színben is megjeleníthetők lettek, valamint a sejt működésében fontos szerepet játszó folyamatok is láthatóvá váltak például a fluoreszcens Ca^{2+} indikátorok feszültségérzékeny festékek használatával.

Mivel önmagában sem a vizsgálandó élő sejteknek, sem a képalkotási eljárásokkal egy időben gyakran használandó, elektrofizio-

1. ábra. Idegsejtek elektrofiziológiai elvezetésének lépései rajzon és képeken: **(A)** Fluoreszcens festéket kilövellő pipetta shadow patching eljárással, valamint a zöld-fluoreszcens proteint (GFP-green fluoreszcensprotein) termelő egér piramissejtje **(B)** QD 625 nm-es bevonatú pipettával
(Andrásfalvy B. és Galinanes G. felvételei)

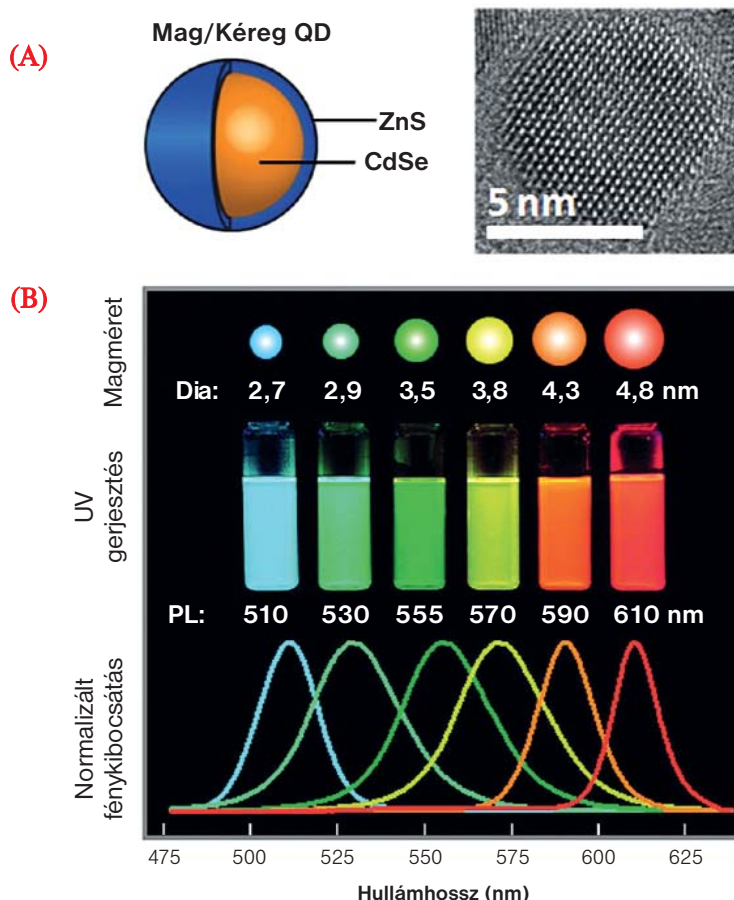


lógiai mérésekhez szükséges üvegpipetták-nak nincs fluoreszcens jele két-fotonos megvilágításban, ezért az élő sejtek célzott vizsgálata esetén szükséges a fluoreszcens szenzor vagy marker jelenléte a sejtben. Mint arról már volt szó, ennek elérésére lehetőség van bizonyos sejtekben fluoreszcens fehérje termeltetésére, akár vírussal való megfertőzés útján, akár genetikailag módosított állattörzsek előállításával. Az így fluoreszcensen láthatóvá tett sejteken már célzott vizsgálatokat végezhetünk. Amennyiben azonban a vizsgálni kívánt sejt nem termel genetikai úton fluoreszcens molekulát, két lehetőség kínálkozik. Az egyik, hogy pipettákkal egy adott sejtet eltalálva azt feltöltjük a pipettába tett fluoreszcens festékkel. A másik, hogy fluoreszcens festéket tartalmazó és azt folyamatosan kilövellő pipettával fluoreszcensé tesszük a vizsgálandó sejt extracelluláris környezetét, amelyben a sejt (ami nem veszi fel a festéket) sötét árnyékként jelenik meg (shadow patching módszer, **1. ábra**).

Az idegtudomány elmúlt 25 évében a vizsgálandó élő szövetek láthatóvá tétele rutinszerűvé vált, ugyanakkor az elektrofiziológiai mérésekhez szükséges üvegpipetták, kapillárisok láthatóvá tétele több problémát is jelentett. Első hallásra paradoxnak tűnik, hogy egy egyszerű üvegpipetta fluoreszcensé tétele nagyobb kihívás, mint a genetikailag kódolt fluoreszcens fehérjék termeltetése élő sejtekben.

A megjelölt sejtek célzott elektrofiziológiai vizsgálatához egy kis (1–2 mikron átmérőjű) szájrnyílású üvegpipettával kapcsolódunk a kiválasztott sejt membránjához. Ehhez az eljárásig pedig a pipettát valahogyan láthatóvá kell tennünk. Ennek két módja lehetséges: vagy a felületet vonjuk be fluoreszcens festékkel, vagy a benne lévő folyadéknak kell fluoreszcens festéket tartalmaznia, mint ahogyan erről már volt szó. Az üveg felületére fluoreszcens festék felhordása úgy, hogy az stabilan rajta is maradjon, sokáig nem hozott elfogadható eredményt. Ezért inkább a pipetta belsejében lévő oldatot töltötték fel fluoreszcens festékkel, melyet folyamatosan pozitív nyomással a szövetbe lövellve, s azt fluoreszcensé téve, láthatóvá vált a pipettahegy. A shadow patching eljárás széles körben elterjedt, de több szempontból is határt szabott a kísérleti lehetőségeknek. Egyrészt a sok fluoreszcens festék szövetbe juttatása nagy háttérintenzitást jelentett ismételt próbálkozásoknál, másrészt hasonló okból nem tette lehetővé a mélyebben fekvő sejtek elérhetőségét.

A fluoreszcens pipetta létrehozása tehát mégiscsak akkor lenne ideális, ha annak falát nagy jelintenzitású fluoreszcens anyaggal vonhatnánk be. Ehhez jó alapanyagként a napjainkban egyre szélesebb körben használt „quantum dot”-nak (QD) nevezett félvezető nanokristályok. Ezek a na-



2. ábra. (A) CdSe/ZnS quantum dot nanorészecske sematikus és elektronmikroszkópos képe. (B) Rajzos és fényképes illusztráció a QD nanorészecske méretfüggéséből eredő kibocsátott hullámhossz-változásra (Algar et al., 2011)

nokristályok méretüknél fogva kvantummechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, melyre nevük is utal. Fénnyel való gerjesztésük során az általuk kibocsátott fény hullámhossza fordított arányban van a kristályok méretével. A fény hullámhossza a vöröstől a kékig változik a kristályok méretének csökkenésével. Éppen ezért nemcsak a kristályokat alkotó atomok milyensége határozza meg a quantum dot elektromos tulajdonságait, hanem méretének változtatásával a kívánt hullámhossz is beállítható, hangolható. Ezt a tulajdonságot használják ki nemcsak a tudomány sok területén, hanem az iparban is, többek közt a még színebb televízió létrehozásához (**2. ábra**).

A kvantum dotal bevonat pipetták készítéséhez szükség volt olyan kémiai bevonat elkészítésére, mely a kvantum dotokat hidrofóbabb varázsolja, s képessé teszi szerves oldószerben való oldásukat és az üvegpipetta falához való tapadást azután is, hogy a szerves oldószer elpárolgott. Az Igor Mednits és csoportja (Naval Research Laboratories, Washington DC) által gyártott, kémiaiailag módosított nanokristályok valóban igen előnyös tulajdonságúnak bizonyultak, az üvegpipetták külső felszínére stabil, nagy

jelintenzitású fluoreszcens markerként tapadtak rá egy általunk kifejlesztett bevonási eljárással. A quantum dotok két-fotonos gerjesztésével elért kibocsátott fény intenzitása nagyságrendekkel felülmúlta a napjainkban széles körben elterjedt fluoro-festékek intenzitását. További előny, hogy a kvantum dotok méreteinek változtatásával lehetőség van arra, hogy a kibocsátott fény hullámhosszát beállítsuk, megválasszuk. A kibocsátott fény maximális hullámhossza 25–30 nm-es sáv szélességű, ami többek közt lehetővé teszi más hullámhosszú fluoreszcens jelek jó elkülöníthetőségét. Így például jól kombinálható a piros, 625 nm-es QD és a gyakran használt Ca^{2+} -szenzorok (pl. OGB-1, GCaMP), melyek kibocsátott hullámhossza zöld. Számos más fluoreszcens indikátorhoz kívánság szerint választhatók a behangolt QD-festékek (**3. ábra**).

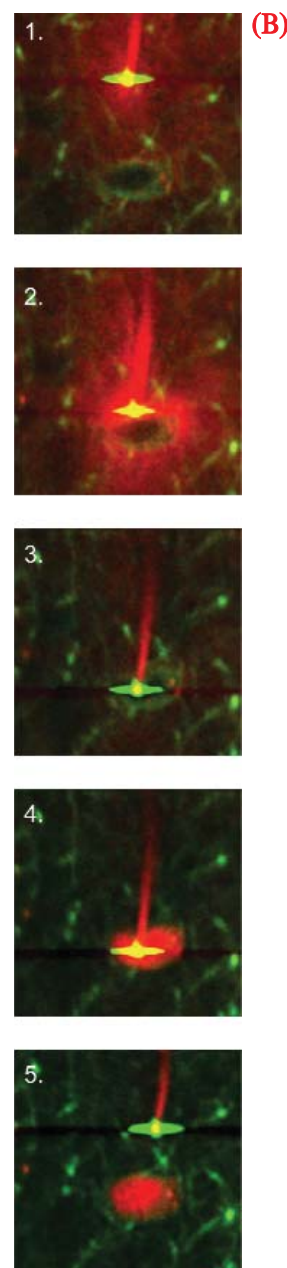
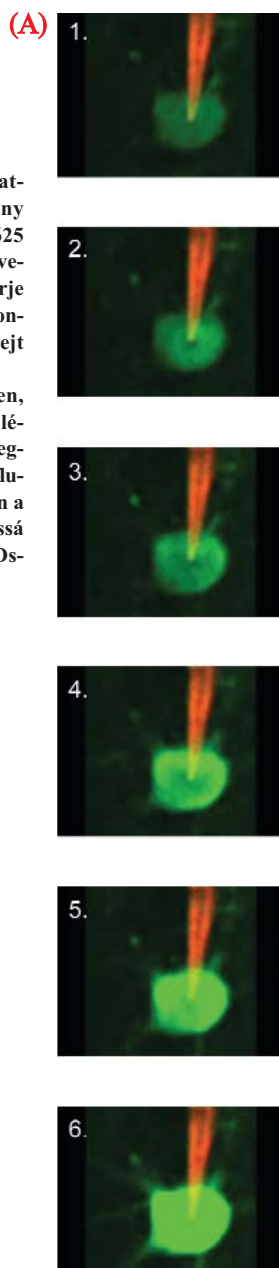
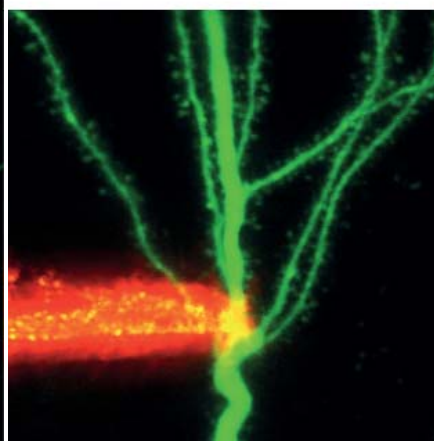
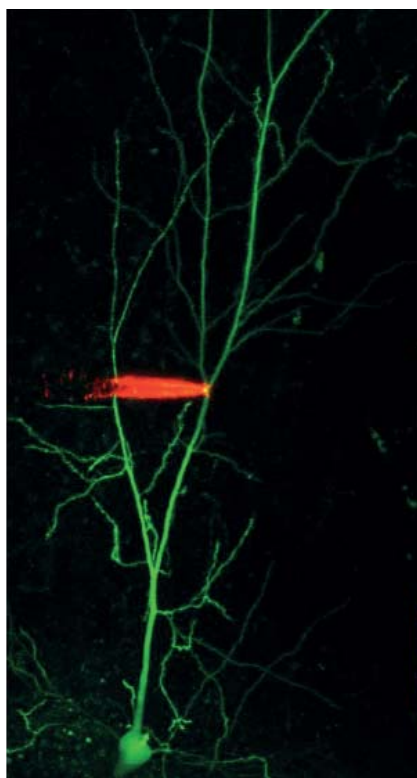
Fontos jellemzője ennek a fluoreszcens pipettakészítési technikának az egyszerűsége, és hogy a pipetta a bevonási eljárás után 1 percen belül már használható is. Az általunk kidolgozott módszer nem igényel semmiféle különleges anyagot, helyet vagy technikát: a frissen elkészített pipettát meg-

3. ábra. *In vivo* elektrofiziológiai elvezetések pillanatfelvételei. (A) Ca^{2+} -koncentráció-változásra érzékeny fehérjét (GCamp6) termelő agykérgi egérsejt, QD 625 nm-es bevonatú pipettával történt elektrofiziológiai elvezetése során jól látható a zöld színű Ca^{2+} -érzékeny fehérje intenzitásának változása, ami a sejten belül Ca^{2+} -ion koncentrációjának növekedését szemlélteti, mely az idegsejt akciós potenciáljainak (tüzelésének) következménye.

(B) QD 625 nm bevonatú pipettával, 760 μm mélyen, EGFP-t termelő idegsejt DsRed elektroporációjának lépései. A pipetta QD 625 nm mellett, DsRed fehérje megtermeltetéséhez szükséges plazmidot és Alexa 594-es fluoreszcens festéket tartalmaz, hogy vizualizálható legyen a pipettában lévő oldat sejtbe jutása a sötét sejttest pirossá válásával. Az elektroporetizált sejtek pár nap múlva DsRed-fehérjét is termelni kezdtek

(Galinanes Gregorio felvételei)

4. ábra. QD 625 nm bevonatú pipettával, Alexa 488 fluoreszcens festékkel feltöltött hippocampális piramissejt dendritfájának elektrofiziológiai elvezetése



felelő tartóeszközzel pozitív nyomás alatt a kívánt színű nanokristály-oldatba kell mártani, és megvárni, míg az oldószer elpárolog, ami alacsony forráspontú anyag lévén pár másodpercig tart. Majd a pipetta azonnal felhasználható, vagy akár hosszú ideig tárolható mindenféle változás nélkül.

Az így előállított pipetták széleskörű tesztelésen mentek keresztül, hogy lássuk, mennyiben változnak meg az üvegpipetták elektromos tulajdonságai, illetve van-e nem kívánt hatása a bevonatnak a vizsgálandó sejtekre. A quantum dot bevonattal csökkent az üvegpipetták kapacitása, ami kifejezetten előnyös mellékhatás elektrofiziológiai szempontból. Mind *in vitro*, mind *in vivo* kísérletek sokaságának elvégzése után sem-

miféle eltérést nem tudunk igazolni a kontrollkísérletekhez képest, ami várható is volt főleg azért, mert a kvantum dot bevonat csak a pipetta külső falán található, s onnan erős kötődése és hidrofób tulajdonsága miatt leválás, oldatba jutás nem volt megfigyelhető.

Az így előállított fluoreszcens pipetták nagy jelintenzitásuk révén élő egérgyban 700–800 mikrométeres mélységekben is jól láthatók a két-fotonos mikroszkópban már viszonylag alacsony lézererő használata mellett, míg a korábban használt technikák, mint a shadow patching, csak < 500 mikrométeres mélységben volt alkalmazható még nagy lézererő mellett is. A módszerünkkel bevont pipettákkal sikeresen végeztünk célzott kísérleteket olyan mélyen elhelyezkedő kéri agysejtekben is, amelyek hasonló vizsgálata eddig nem volt lehetséges. Mindezek mellett kisebb sejtrészek, vékony dendritfák, axonok is könnyebben hozzáférhetővé váltak így, amíg a shadow patching ezt nem tudta megadni (4. ábra).

Az elmúlt évtizedben az agyi sejtek *in vivo* vizsgálata – mind a képalkotó, mind az elektrofiziológiai, vagy mindkettő egyszerre – teljesen új ablakot nyitott agyunk működésének megismeréséhez. Előtte sejtszintű behatóbb vizsgálatra főleg agysejtekben nyílt csak lehetőség, kiragadva azt az egész idegrendszer működéséből, most azonban szinapszisok szintjéig vagyunk képesek vizsgálni úgy, hogy az állat feladatokat hajt végre, tanul, emlékezik. Sőt, optogenetikai eszközökkel képesek vagyunk sejteket, sejtcsoportokat, vagy kisebb áramköröket úgy manipulálni feladatvégrehajtás közben, hogy később akár csak egy sejt fénnel való aktiválásával/gátlásával egész cselekvéssort képesek vagyunk beindítani/leállítani. Napjainkban a QD-tal bevont pipetták mindezen kísérletekhez elengedhetetlen kellékké válnak.

Az elmúlt években kezdődött a '80-as években felfedezett kvantum dot nanorészecskék reneszánsza. Az általunk kifejlesztett technika csak egy a sok száz más lehetséges alkalmazásból. Kvantum dotot előszeretettel használ az immunhisztokémia, de alkalmas lehet akár egyetlen fehérje sejtben belüli/kívüli transzportjának vizualizációjára, sejtmembránban molekulák mozgásának detektálására és sorolhatnánk tovább. Az alapkutatások mellett az ipar is foglalkozik hasznosításukkal, amelynek leglátványosabb megjelenése az idén piacra kerülő QD-tévék, ahol a színek sokkal erősebbek és élesebbek lesznek, mind elődeiké, kihasználva a QD-ok méretfüggő hullámhosszhangolhatóságát. Így segítve a nézőt, hogy a megismerendő világunkról készült műsorok még életszerűbbek legyenek a képernyőkön.

Irodalom

Algar et al. Anal Chem. (2011)
Andrásfalvy et al. Nature Methods (2014)

CSÁJI ATTILA

A technika és a tudomány
új eredményeit merítsük meg az emberi
pszichikum mélységeiben

A fényművészetről a Fény Évében

A Fény Nemzetközi Évének ürügyén nem kívánom a nemzetközi fényművészet történetét ismertetni, még a magyarét sem. Ehhez komoly művészettörténeti kutatás szükségeltetik, és ez még várat magára, hiszen a fényművészet a jelen dinamikus terebélyesedő vizuális lehetősége. Csupán vázát nyújtom a témának. Néhány alapgondolatra és összefüggésre hívom fel a figyelmet, melyben művész voltomnál fogva szubjektív és – mivel múltja van – természetesen történeti elemek is vannak.

A fény az élet megújuló energiáinak forrása, fizikai valóságunk egyik fundamentuma, egyben a legnagyobb emberi élmények egyike. A láthatóság alapoka. Fény nélkül

nem csupán a képzőművészet élvezhetetlen, hanem a művészetek tekintélyes része is felfoghatatlan. A magyar nyelv világtalanak nevezi azt, aki nem lát. A látás valóban információink elsöprő többségének a forrása, de a XX. századig a képzőművészet inkább a fény teremtményei foglalkoztatták, s nem a fény közvetlen képi alakítása. A fényművészet gyökerei ugyan az ősi-ősidőkbe nyúlnak, de a „testetlen” fény, mint önálló képteremtő lehetőség, csaknem száz éve, az első világháborút követő években realizálódott gondolat. Felvetésében kiemelkedő szerepe volt a Bauhausban Moholy-Nagy Lászlónak, akire úgy tekinthetünk, mint a nemzetközi fényművészet megindítójára. Ez a kirobbanó energiájú, út-

Csáji Attila: Mitikus fénytér/lézerfény-környezet (Kiscelli Múzeum)





Csáji Attila: Lapok Borgesnek XII, lézersuperpozíciós kép

törő mester már a XX. század első évtizedeiben mély meggyőződéssel hirdette, hogy a jövő legtöbb műve a fényfestő feladata lesz, noha a korabeli eszközrendszer úgy viszonyul a mához, mint egy kétszárnyú repülő az űrrakétához.

Az úttörők között a dán-amerikai Thomas Wilfredet, a Lumnia létrehozóját is meg kell említeni. Egyik lényeges különbség köztük, hogy Moholy-Nagy gondolatai termékeny talajra találtak, kezdeményezését folytatták. Ez megtörtént a Bauhaus által is, de ezt követően még erőteljesebben. Ebben elsősorban Kepes Györgyöt kell kiemelni. Wilfred hosszú ideig még a dán művészek előtt is ismeretlen maradt. Amikor a hatvanas-hetvenes években például G. A. Andersen, aki főként a fény polarizációjának művészi lehetőségeivel kezdett foglalkozni, Helge Krarup, a fényművészet dán történetírójának a megállapítása szerint Wilfredet nem ismerte, s ez nemcsak rá vonatkozott, hanem kollégáira is. Csak az utóbbi másfél-két évtizedben, különösen a koppenhágai Lux Európát (2002) követően vált Wilfred Dániában is fényművészként ismertté. Ennek alapján is nyugodtan állíthatjuk, hogy a fényművészet lényegileg magyar kezdeményezés. Sok tekintetben szinte hungarikum. Messze nem véletlen, hogy

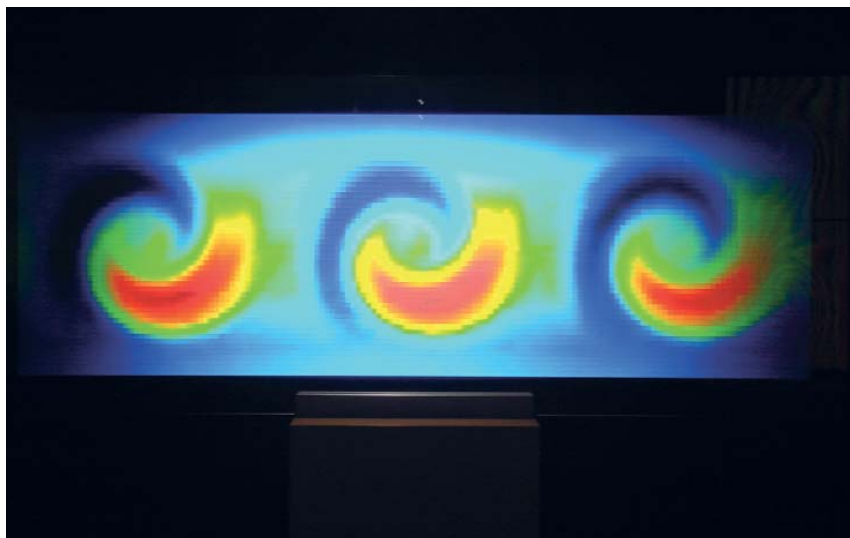
a Fény Éve alkalmából olyan nagyszabású fényművészeti kiállítások, mint Magyarországon, kevés helyen valósultak meg.

Visszatérve Moholy-Nagyhoz: fény és tér modulátora a konstruktivizmusból nőtt ki, az első pillanatokban az irányzathoz kap-

csolódó szoborként hat, de alapfeladata más. Döntő: a fény alakítása, fénykörnyezet teremtése vetítés által. Önmaga is része a látványnak, de a teljes élményt a környezettel együtt teremti meg. A fénymodulátort működés közben filmen is rögzítették „Fekete-fehér és szürke fényjáték” címen. A film készítésében Moholy-Nagy munkatársa az a Kepes György volt, aki a fényművészet gondolatát a legerőteljesebben és legkövetkezetesebben vitte tovább az Egyesült Államokban. Ő vezette Chicagóban, a New Bauhausban, majd a School of Designban a fény osztályt, később ő volt az, aki létrehozta Cambridge-ben a Massachusetts Institute of Technology-n az első mediális kutatóintézetet, a Center for Advanced Visual Studies-t, ahol művészek, tudósok és technikusok egymásra találhattak a vizuális világ határainak a tágításában, az új lehetőségek és eszközök humanizálásában. 1967-ben jött létre ez a modellértékű intézet. Kepes György szerepe rendkívül termékenyítő volt. Szellemi alapteremtése, előadásai, különösen könyvei, mint „A látás nyelve,” vagy a „A világ új képe a művészetben és a tudományban” a XX–XXI. századi vizuális kultúra alapkérdései közé tartoznak, s angolról számos nyelvre lefordították. Megvalósult fényművészeti munkái közül kiemelkedik, a KLM Holland Királyi Légítársaság programozható New York-i fényfala (1959), a milánói triennáléra tervezett „Város éjszakai tájképe” (1968) és az ősi képzeteket idéző „Lángok kertje” (1971) című munkája, melyben Paul Earls zenéjének hangja vezérli a gázcsövekbe rejtett membránokat, befolyásolja a tűz táncoló, elcsituló, majd fellobbanó játékát.

A fény elanyagtalánító használatával a Moholy-Nagy-i gondolatot viszi tovább felpolirozott, tükröződő, mozgó szobraiban a kalocsai születésű Nicolas Schöffer is. Ez-

Mattis Teutch Waldemar: Maelström Pixel hologram



zel nem megsemmisíteni akarja a mű konstruktív értékeit, hanem felszabadítani annak szerkezetét és feltárni rejtett gazdagságát. Láttatni akarja a megvilágítás tudatos változtatásával kinetikus munkáinak értékeit. Amikor Kepes Györgynek – visszatérő beszélgetéseink egyike alkalmából – említettem, hogy ez a lépés nem a tiszta fényművészet felé visz, hanem ellenkező irányban, mélyen egyetértett. Ez Schöffer nagyleptékű munkásságának az értékéből semmit nem von le, hiszen „spatio-dinamizmus” komoly mértékben tágitotta a vizualitás lehetőségeit és az esztétikum határait, de valamire felhívja a figyelmet. Lassú és kanyargós az út a tiszta fényművészet megerősödéséhez, a kinetikus, mozgó szobrok-tól való függetlenedéshez.

Ha a vizuális kifejezésre, megjelenítésre koncentrálnunk, akkor meghatározóvá válhat, hogy a fényjelenség egy kinetikus munka részeként jelenik meg, mint például Nicolas Schöffernél történik, vagy ettől a szerkezettől, mobiltól függetlenül, önálló alkotásként. Az idő múltával egyre erőteljesebbé vált az a véleményem, hogy a tiszta fényművészet kialakulásának egyik lépcsőjeként tekinthetünk csupán a fénykinetika-nak azokra a megnyilvánulásaira, melyek pl. Schöffer fénydinamikus konstrukciói és a hasonló alkotások esetében jöttek létre. Ha ezeket a fényművészethez soroljuk, annak csak a perifériáján helyezkedhetnek el. Ez természetesen nem érinti rangját és értékeit. Az osztályozás nem a művész feladata, de az alkotás folyamatában és a vizuális nyelv használatában újra és újra felmerül, és ezt erősíti a körülöttünk levő és születő világ elrendezésének az igénye is. A mesterséges fény felhasználásával a kinetikus konstrukció statikus elemei dinamikussá formálódhattak és felerősítették a mű elanyagtalánításának a folyamatát. A lényeg a fény eszközként való felhasználása a konstrukció önműn értékeinek feltárásában, s nem a fénykörnyezet megteremtésében. A fény elsősorban értelmezőként szerepel, mint egy esti városképben az épületek megvilágításánál. A kinetikus konstrukció vagy az épület értékeinek feltárásában kétségtelen komoly szerepe van, de itt a felszabadító nagy lépést a fényművészek később teszik meg.

Az utóbbi évtizedekben az „elanyagtalánítás” igénye egyre erőteljesebbé vált. Ezt felgyorsította az eszközöknek az a feloldulása, ami az utolsó évtizedek elektronikai, különösen optoelektronikai forradalmával együtt járt. Schöffer, a korabeli kinetikusok, de Kepes sem használt mai értelemben vett csúcstechnológiát: lézert, holográfiát, nagyteljesítményű, 10–20–30 000 anslumenes vetítőket, optoelektronikai eszközöket (fototranzisztort, lézerdíódat, fényemissziós diódat stb.). Ezeknek az eszközöknek a művészek által történő részleges és folyamatos meghódítása gyorsította fel azt a folyamatot, mely egy új lépcsőhöz, a



Kepes György: KLM színház, New York

tiszta fényművészet megerősödéséhez vezetett. Hogy mit tekinthetünk tiszta fényművészetnek, ennek a meghatározását 1980 januárjában a következőképpen rögzítettem:

„A fényművészet a „testetlen fény” közvetlen artikulációja – mely a fénytulajdonságok ismeretében, vetítés vagy mesterséges fényerjesztés által realizálódik. Virtuális valóság, melynek különálló elemei önmagukban csak a mű lehetőségének hordozói. A meghatározó látvány a néző előtt születik meg.”

E folyamatban kiemelkedő szerepe van a lézernek. Hajdan Moholy-Nagy László arra biztatta a festőket, hogy meghitt viszonyt alakítsanak ki a fényvel, ismerjék meg tulajdonságait. Ez a meghitt viszony terjedjen ki a különböző optikai eszközökre: lencsére, prizmákra, optikai rácsokra, fényforrásokra. A lézernek, amit mintegy hatvan évvel ezelőtt hozott létre Theodore H. Maiman amerikai fizikus, a fényforrások között merőben új tulajdonságai vannak: egy pontba koncentrálható, ebben a pontban nagy fényerő sűrűsödik össze, és a keletkező fény monokromatikus. Ezekre a fénytulajdonságokra eltérő képi lehetőségek épülnek, me-

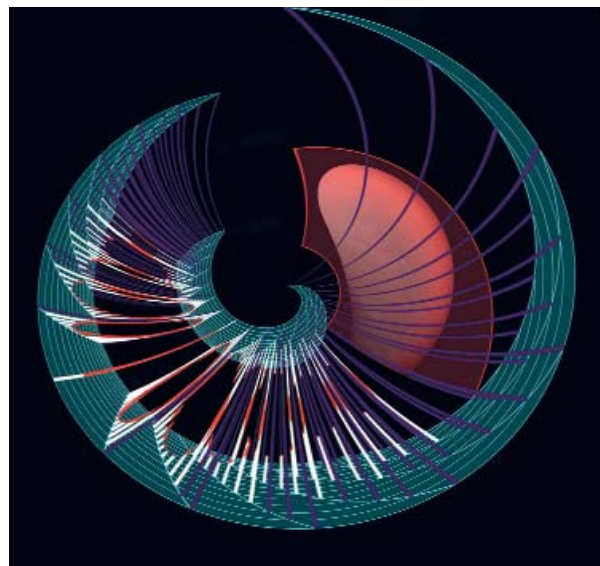
lyek a tiszta fényművészet eszköztárát fel-dúsították. Feltárásuk az elmúlt évtizedekben történt.

Engedjék meg, hogy a lézer képi lehetőségeinek a taglalásában szubjektív hozzáállásomat fokozzam. Ebben a feltárásban kapcsolódtam bele csaknem 40 évvel ezelőtt Kroó Norbert, a magyarországi lézerkutatás vezetőjének a meghívására. A Központi Fizikai Kutató Intézetben létrehoztuk a Foton Art csoportot, melyben az analitikus kutatás és a felszabadult játék sajátos transzparenciája alakult ki, s szinte természetszerűen formálódott az a meghitt viszony a fényvel és az optikai eszközökkel, amelyre Moholy-Nagy célzott. A festő szempontjai voltak a kutatásban a meghatározóak: milyen képi lehetőségei vannak a lézer egyes fénytulajdonságainak?

Kezdjük a pontszerűséggel: a fényforrásból „kirepülő” pontot tükrökkel meg lehet mozgatni és a pont folyamatos vonalakká alakítható. Ha megfelelő céleszközöket, vezérlő elektronikával, komputerrel irányított szkennereket használunk, rajzolni lehet vele. Ez az egyik alaplehetőség. A KFKI-ban akkor rendelkezésünkre álló eszközök a



Bortnyik Éva–Tubák Csaba: Fényinstalláció



Mengyán András: Bábu, UV-érzékeny festékekkel készült kép

COCOM-lista (a keleti blokk országait sújtó, multilaterális kereskedelmi embargó – *a szerk.*) miatt ezt a lehetőséget csaknem kizárták. Ezzel a lehetőséggel jóval később a Massachusetts Institute of Technology-n töltött időszakomban barátkoztam meg. Ez a pontszerű fény, mellyel vonalas rajzok teremthetők, fel tudja kelteni azt az érzést is, hogy részesülünk a műalkotás születésében, hiszen a kivetített pontból akár a szemünk előtt rajzolódhat ki a kívánt motívum.

A vonal a legelemibb kifejező eszköze a képzőművészeknek, s idézi az ősi időköt, a sziklarajzokat és a sámándobok ábráit. Velük kezdődik a látvány művészete. A csücs-technológiák keltette lehetőségek szembe-sítése az indulással számomra komoly ki-hívás volt. Megvalósítása „Lappok és lap-top” című fénykörnyezetem létrehozásában realizálódott a Kiscelli Múzeum komor és ro-mos templomterében. A fénytér mitikussá vált.

A lézerefény második tulajdonsága, az egy pontba koncentrálható nagy fényerő az anyag megmunkálás eltérő lehetőségeit hor-dozza, vagy többek között a térben megva-lósítható vizuális konstrukciókat.

Engem a lézer harmadik tulajdonságá-ból, a monokromatikusságából eredő lehe-tőségek foglalkoztattak leginkább. Ebből fakad interferencia-képessége. Hosszú kutatás és elemzés kapcsán erre építettem rá egy képi transzformációs módot, az ún. szuper-pozíciós módszert még 1977–79 között (1980 januárjában szabadalmaztattuk). Ki-derült, hogy képi világa nemzetközi unikum. Ennek alapján választott a Massachusetts Institute of Technology mediális kutató inté-zete a Center for Advanced Visual Studies taggá. A nemzetközi szakirodalom az in-terferenciákra úgy tekintett, mint olyan fi-

zikai jelenségre, mely a művészek által nem alakítható, komolyan nem befolyásolható. A módszer ebben hozott komoly változást. Az elmúlt évtizedekben kiderült, hogy újabb és újabb optikai eszközök megfelelő hely-re történő beiktatásával a látvány rendkívül gazdagon tovább alakítható. A Műcsarnok-beli életmű-kiállításomon ez is nyomon kö-vethető volt.

A holográfia szintén a lézer harmadik fénytulajdonságára, nagyfokú rendezettsé-gére, koherenciájára épül. Gábor Dénes 1947-ben hozta létre a módszert, jóval a lé-zerek felfedezése előtt, de a holográfia kibom-lásának igazán a lézer teremtett lehetőséget.

A síkon a teljes kép létrejöttének ma már számos válfaja ismert: reflexiós holográ-fia, transzmissziós holográfia, pixel holo-gráfia, shadowgram stb. Ezek közül a mű-vészek által a legkönnyebben használható és az egyik legkedveltebb a pixel holográ-fia, mely alkalmas nagy felületű szinstruk-túrák létrehozására, s technikailag a legke-vésbé bonyolult. A Kepes Társaság tagjai kö-zül Mattis Teutsch Waldemar, Michael Ble-yenberg, Dieter Jung, valamint én foglalko-zom holográfiával. Jelenleg az egri Kepes Központ fényművészeti kiállításán számos válfaja megtekinthető.

A nagyteljesítményű vetítések esetében is a tiszta fényművészet lehetőségei válo-sulnak meg eltérő szinten. Ezeknek a vetí-téseknek Bordos Zsolt kiemelkedő képvi-selője. Általában épületekre vetít, de az általa használt 10–20–30 000 ansilumenes projektorok nem pusztán azt a valóságot láttatják, amit megvilágítanak – természe-tesen azt is –, hanem ezekre vizuális kiin-duló pontként tekint, amelyek értelmezésén keresztül egy felszabadult új látvány meg-teremtésében teljesedik ki az élmény. Meg-nő a mű szabadságfoka.

A lumineszcencia jelensége, az ultravio-la-fényérzékeny festékek használata a fény-művészet ezektől merőben eltérő lehetősé-geit hordozza.

A magyar művészek közül Mengyán And-rás életműve kiemelkedő szerepű. Egyéni utat teremtett magának főként az elektrolu-minescencia, ezen belül a fotolumineszcencia jelenségének a differenciált és lele-ményes felhasználásával, jellegzetes geo-metriai struktúrák létrehozásával. Felismeri, hogy a fényviszonyoktól függően eltérő lehet a képek olvasata. Másként tagolják a síkot a fotolumineszcenciára érzékeny, sajá-tosan aktivált festékekkel létrehozott vona-lak, görbék, idomok, mint az átlagos pig-ment festékekkel készültek. Az ismert geo-metriai struktúráktól eltérő karakterű te-rek, szimmetriák, dimenziók hozhatók lét-re általuk. Az ún. „fekete-fény” segítségével színei helyenként agresszívok és élén-kek lettek, gyakran fekete háttérből bonta-koznak ki – a lumineszcencia érvényesülé-sét ezáltal is fokozzák.

Ahogy tudjuk, a lumineszcencia az elekt-ronoknak a gerjesztett állapotból az alapá-lapotba való spontán visszatérését kísérő fényemisszió. Ezeknek a lumineszcens szí-neknek eltérő a színtelítettsége és érzéke-lési intenzitása a gerjesztett állapotot me-gelőző helyzetben lévő színektől. Men-gyán András képeinél tapasztalhatjuk, hogy a „lucenera”, a feketefény és az UV-aktív anyagok eltérő kombinálása a tudatosan ki-alakított struktúrákban varázslatos fényha-tásokat teremthet. Mindezt imponáló elmé-lyedéssel és következetességgel hozza létre. Ultraviola fényre érzékeny festékeket hasz-nál Kuchta Klára is néhány textil munkáján.

*

A Fény Éve folyamán megvalósuló tár-la-ton látható munkák közül külön kategó-

riát jelentenek a fényinstallációk, pl. Bortnyik Éva és Tubák Csaba munkái. A vizuális élmény a tárgy s a rávetített videó kölcsönhatásából származik. Várnai Gyula tevékenysége is nagyrészt ide tartozik.

Azáltal, hogy az UNESCO a Fény Nemzetközi Évének nyilvánította 2015-öt, néhány nagyszabású rendezvény megvalósítására teremtett lehetőséget.

A szélesebb közönség is szembesülhetett azzal a ténnyel, hogy a fényművészet Magyarországon a művészek egyre szélesedő rétegét érinti. A művészeti események indító központja a Műcsarnok volt. Fényművészeti kiállítások hosszú évek óta valósulnak meg Magyarországon, elsősorban a Nemzetközi Kepes Társaság jóvoltából, de ilyen sűrűségben, mennyiségben és terjedelemben még soha. Egyéni és közös tárlatok, előadások, konferenciák, fényfesztivál és egyéb rendezvények követték és követik egymást.

Az események nyitánya egy, döntően a fényművészetre épülő egyéni életmű-kiállítás, több ezer négyzetméteren, a Műcsarnokban.* Folytatódta a nemzetközileg is úttörőnek tekinthető fényszimpóziumok, a Kepes Társaság Fényműhelye a Mélycsarnokban mutatkozott be, melyet Szvet Tamás Fényidézés című tárlata követett. Interaktív fényinstallációival az elmúlt 90 év magyar fényművészetébe teremtett betekintést.

A magyar fényművészetre épülő nagyléptékű tárlatot rendezett az Új Budapest Galéria – Goethét idézve – „Több fényt!” címmel (kurátora: Paksi Endre Lehel). Az ősz nyitó kiállítása, s az év fényművészeti eseményeinek a megkoronázása az egri Kepes Intézetben rendezett és az év végéig nyitva tartó „Fény(ny)elvek” c. nemzetközi fényművészeti kiállítás (kurátora Orosz Márton). Ez az év legnagyobb szabású fényművészeti rendezvénye, három szinten, több ezer négyzetméteren.”

Végezetül hadd idézzek egy régebbi írásomból:

„Hogy a fényművészet túl van vagy innen az avantgard, posztavantgard vagy posztmodern elképzeléseken és dogmákon, ezzel nem foglalkozom. A fényművészet olyan belső dinamikával rendelkező területe a vizualitásnak, mely nem egy lezárult vagy lezáródó művészettörténeti korszak egyik stílusa, vagy irányvonala, hanem az utolsó évtizedekben kibontakozó új mediális lehetőségek jövőbe ívelő együttese, melynek kialakulásában komoly katalizáló szereppel bírt az optoelektronika dinamikus fejlődése, és az az alapvető emberi igény, hogy a technika és tudomány új eredményeit az emberi pszichikum mélységeiben megmerítsük.”

* A szerző életmű-kiállítása.

** Kepes Intézet, Eger, Széchenyi utca 16.

Versenyfutás az árnyékkal

avagy az 1999. augusztus 11-ei napfogyatkozás hiteles története

BACSÁRDI LÁSZLÓ – FRIEDL ZITA

Széchenyi István Gimnázium, Sopron

Helyszín: Szeged; Szatymaz környéke; a Kiskunmajsa–Kiskunhalas összekötő út; Soltvadkert–Tátlár összekötő út.

Szereplők: Bacsí, Zita, Tanárnő és persze a Dacia.



Hárman a szereplők közül

Ahogy mi láttuk

3.14: Kis csapatunk összegyűlt a bejárat ajtónál. A találkozó oka azonban még nem a terepre indulás, hanem az elkeseredetten csipogó kaputelefon volt. Hívatlan (és ismeretlen) vendégünk csak annyival járt jobban, mint a farkas a kismalacos mesében, hogy őt hideg vízzel öntöttük le az erkélyről.

5.00: Mivel eredetileg mi is egy korai indulást (na de nem ennyire!) terveztünk – hogy elkerüljük a beharangozott nagy forgalmat –, ezért már nem feküdtünk vissza, hanem belevágtunk a nagy kalandba: napvadászok, előre! Akkor még nem sejtettük, hogy ha valakire, akkor ránk tényleg illeni fog ez a megnevezés.

5.31: A napfelkelte már az előző nap kiválasztott terepen talált minket. Egy egész napos kutatóút eredményeképp egy Szatymazról induló kis útról tértünk le a tanyához vezető földútra. És vannak még csodák! A tegnapi még romjaiban heverő magasság újáéledt! Csak azok a felhők nem valami biztatók ott északnyugat felől...

6.00: A vész kitört. Szélvihar, dörgés-vilámlás, és özönvíz. Még reménykedünk,

Az 1999. évi, IX. Természet–Tudomány Diák-pályázatunk „Napfogyatkozás–1999” kategóriájának I. díjas írása. Első megjelenés: Természet Világa, 2000. 6. szám.

hogy mire a nap legnagyobb eseménye kezdődik, kiderül. Addig is hasznosan töltjük az időt: csendes pihenő!

9.00: Kezdjük feladni a reményt. Ez azt jelenti, hogy át kellene helyezni a főhadiszállást tisztább ég alá. A probléma mindössze annyi, hogy az eső az utat sártengerré változtatta, pedig az már eleve szép mély gödrökkel volt tarkítva. Sofőrünk bejelenté, hogy ilyen útviszonyok mellett nem hajlandó vezetni.

9.05: Az első pillanatban a legkézenfekvőbb megoldást választjuk: megpróbáljuk a kocsit kitolni az aszfaltútig.

9.30: Sikerült előrejutni egy métert és leküzdeni egy kb. 5 cm mély árkot. Előttünk áll még 50 méter és – többek között – egy legalább fél méter mély pocsolya. A csoport egyetlen, jogosítvánnyal rendelkező tagja is belátja, hogy ha napfogyatkozást akar látni, akkor elveit és félelmét félretéve, mégis be kell szállnia az autóra.

10.00: Hurrá, a Dacia ráfordult az aszfaltútra! Mindenkinek sárig ér a szája: ugyanis a fülünkön is az bugyog ki. De a csapatmunka, egy vezet, kettő tol, meghozta gyümölcsét.

10.10: És a kicsi kocsi száguld! De újabb kérdések merülnek fel, pl. merre tovább? Az első faluban nekilátunk telefonálgatni ismerősöknek, mit tudnak az időjárásról és az előrejelzésről, de nem leszünk okosabbak. A rádió is csak azt mondja, amit magunk is tapasztalunk: Szeged környékén vihar dül. Hát akkor előre a kék ég irányába! Csak visz-e arrafele út? Talán a kiskunmajsai jó lesz! Hát akkor hajrá!

11.15: Úgy tűnik, jó választás volt erre venni az irányt. Napsütötte mezők között ha-

ladunk, jobbra-balra kocsik állnak a bekötő utakon, utasaik pedig hanyatt fekvén nézik az eget, az első kontaktusra várva. Szerencsére hagytak nekünk is egy leágazást, gyorsan befordulunk. Na, ez az, amit nem kellett volna, de csak későn észleljük, hogy valami gyanús dologba süppedt a kocsi. Azonban nincs idő most ezzel törődni, hisz mindjárt kezdődik az első felvonás! Gyorsan felállítjuk a távcsövet, Zita helyes körgallért is gyárt rá, az egyik videót is belőjük a Napra és helyi, azaz Zita-idő szerint.

11.30: Tanúi lehetünk az első kontaktusnak. A világ legszerencsésebb embereinek gondoljuk magunkat, kezdjük berendezni új táborhelyünket, amikor...

11.45: Megjelennek az első felhők. Gyors tanácskozás után egyetértünk abban, hogy ha már egyszer kihúztuk a kocsit a kátyúból, akkor használjuk is, tehát: táborbontás, beszállás, rükcverc, és a kocsi meg se mozdul. Most adjuk fel? Soha! A tolémberek szó nélkül foglalják el helyüket, és mindenki belead apait-anyait, a vezető pedig gázt. Eredmény: egy kissé leégett kuplung, de a kicsi kocsi újra száguld!

12.00: A déli haragszót azon az úton hallgatjuk, amelyen Sopronból jövet autóztunk. Vagyis Kiskunmajsa–Tázlár–Soltvadkert útvonalon. Közben elmélkedünk, hogy vajon odahaza milyenek lehetnek a látási viszonyok. Lehet, hogy jobban jártunk volna, ha nyugton elülünk otthon, és nem dőlünk be a „napfény városa” szlogennek?

12.30: Vészesen közeleg a totalitás kezdete. Amit lehet, összekészítünk a kocsiban, pl. a szűrő felhelyezése a videóra stb. Mert készültünk ám: felszerelkeztünk 3 videokamerával, hoztunk távcsövet a kivetítéshez, különböző szűrőket, és persze a nélkülözhetetlen napfogyatkozás-néző szemüvegeket (Sonix, gyártó: Forte; Relax, forgalmazza: Intersect). A kamerákra egyrészt a Fizikai Szemle mellékleteként kapott szűrőt tettük, a másikat Bacsai a Telescopium boltjában vásárolta. Most már muszáj megállni, akárhol is vagyunk. Ismét szerencse a szerencsétlenségben: egy szimpatikus (és magányos) kis mező bukkan fel jobboldalt. Egyik oldalán vályogvető házikó, másik oldalán kis tanya. Táborverés rutinosan, rekordidő alatt. Még a műszerekről sem feledkezünk meg. Rólunk ugyan dől a veríték, de a hőmérő szerint már csak 20 °C van.

12.44: Mindenki elfoglalja a helyét egy videónál, és beosztjuk, ki mit próbál rögzíteni a totalitás alatt. Közben „esteledik”. Mindegyikünkön egy kis izgatottság érezhető. Végül is ez életünk első teljes napfogyatkozása! Egy olyan élmény, ami nem minden



A fogyatkozó Nap képe tenyérre vetítve

nemzedéknek adatik meg a Kárpát-medencében.

12.51: Egy felhő hozza ránk a szívbajt, de végül megkegyelmez nekünk, és a Nap alatt úszik el. Erről a tényről 10 km-es hatótávolságon belül mindenki értesül Bacsai örömváltása révén. Bacsin egyébként is a megbolydulás jelei észlelhetők: összefüggéstelen dolgokat kiabál, miközben videóstul sámantáncot jár. Na nem sokáig, mert amikor letiporja a műszereket, Zitától rögtön megkapja a magáét.

12.53: Rohamléptekben sötétedik. Nem is tudjuk, mit figyelünk: a csodálatos színekben játszó eget a hátunk mögött, vagy a felhők közül előbukkanó Vénuszt. Bacsai veszi először észre a Hold krátere között átszűrődő napsugarak alkotta Baily-féle gyöngyfűzért. Hát elkezdődött! Lenyűgözve nézzük, hogy válik láthatóvá a napkorona. Bár tudjuk, hogy ezt a látványt a videófelvétel nem képes visszaadni, megpróbáljuk felvenni a kamerákkal. Az izgalom meghatottsággal vegyül. Bacsai a Himnusz elénklését javasolja, de ezt a programpon tot pillanatnyilag elhalasztjuk. Zita a lelkiismeretesség megtestesítőjeként visszatér a műszerekhez. Mire sikerül egy kis fényt csiholni, hogy látszódjon is valami a felvételen, Bacsai már lefújja a második féldőt.

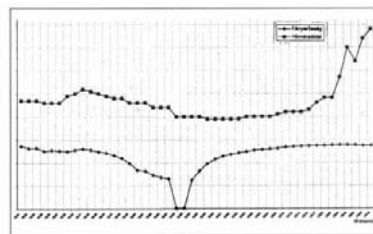


A gyémántgyűrű

12.56: Nem akarjuk elhinni, hogy vége. Kell egy kis idő, mire magunkhoz térünk, és képesek vagyunk olyan gyakorlati dolgokkal foglalkozni, mint pl. a szűrő visszahelyezése. Közben a fény visszaveszi uralmát a sötétség fölött, de a napfogyatkozás ezen szakasza kimaradt az életünkéből, mert gondolataink még mindig az átélt élmény körül forogtak.

13.01: A harmadik felvonás alatt számba vesszük, hogy mit láttunk, és mit nem, mi az, amire legközelebb jobban figyelünk. Mert a végkicsengés az, hogy az életben még egyszer látni kell egy teljes napfogyatkozást! Sajnos az állatvilág megfigyelésére nem volt alkalmunk, bár Zita szerint a tücskök a totalitás alatt rázendítettek. Az árnyékok élesedését se vettük észre, és a videóon sem sikerült ezt teljesen rögzíteni. Viszont teljesen jogos Zita megjegyzése, hogy ekkora sötétségnézőt nem kellett volna keltetni. Mert éppen csak annyira sötétedett be, hogy a műszereket ne lehessen a vide-

ón rendesen látni. Számunkra egy kis csatlódást okozott, mert a korábban elolvasott sok beszámoló alapján azt hittük, hogy az orrunk hegyéig sem fogunk látni. Lema radtunk a téli csillagképekről is, de inkább ezeket takarja felhő, mint a Napot! A gyöngyfűzér és a korona azonban – Bacsai szavaival élve – iszonyú szép volt. Zita még a látvány hatása alatt megfogadja, hogy mégis csillagász lesz. Bacsai ezt csak azért nem teszi, mert már régen eldöntötte.



A hőmérsékleti és fényerősségi minimum összehasonlítása

Közben szorgalmasan gyűjtjük az adatokat is a hőmérsékletre és a fényerősségre vonatkozóan. A 20 °C-os érték sokáig tartja magát, majd hirtelen elkezd növekedni egészen 36 °C-ig. A fényerősség a totalitás elmúltával ugrásszerűen, majd egyenletesen növekszik. Mindezekről a digitális voltmérőkhöz csatlakoztatott nap-elem, illetve termoelem kijelzőjéről értesülünk. A Nap „dagadását” távcsöves kivetítéssel és persze élőben, a jó kis napfogyi-szemüvegeken keresztül is nyomon követjük. Sőt az előzőleg olvasottak (www.mcse.hu) alapján megpróbáljuk a kezünk-re is kivetíteni. És lám, nem mágia, sikerült. De ezek az események eltörpülnek a totalitás során átéltek mellett.

14.17: A nagy nap élményeitől kissé elcsigázottan várjuk, hogy legördüljön a függöny: a Hold korongja elhagyja a napkorongot. A kivetítésem követjük nyomon az utolsó kontaktust, bár még így is nehéz megmondani, mikor következett be pontosan.

14.38: Hagyományainknak – amelyek még a Hale-Bopp-üstökös megfigyelésének korszakából erednek – megfelelően tort ülünk, amelynek desszertjeként elfogyasztjuk a külön erre az alkalomra készített napfogyibontot.

16.23: Teljes napfogyatkozás legközelebb 2001-ben – ebben a tudatban térünk vissza Szegedre. De ez a nap (Nap?) tartogatott még meglepetéseket! A Szabadtéri Játékokon este láthattunk még egy napfogyatkozást. Igaz, a délelőtti kicsit eredetibb volt.

Ahogy a Hold láthatta volna

Helyszín: a harmadik bolygó (kék) körüli bolygóközi tér.

Szereplők: Hold, Nap, emberkék.

Még nem tudok (le)nyugodni. Figyelem a bolygómat, ami körül már egymilliárd éve keringek. Az éjszaka csendes. Kezdek fájni, csak a hátamat súti a Nap.

Figyelmemet valami mozgás vonja magára. Három alak a sötétben egy nagy piros dobozba próbál betuszkolni kisebb dobozokat. Aztán meg magukat és már száguldanak is. Menekülnek? Nem, ezek tudják, hova mennek. Oda is értek, most meg kiszórják a dobozokat. Ki érti ezt?

Most gyönyörködnek a napfelkeltében. Bárcsak én is láthatnám egyszer...

A Nap még mindig a hátamat súti, a Földről ezért nem vagyok látható, csak én látom őket. Bolygóm a hatmilliárd emberke, mint hangyák össze-vissza szaladgálnak. Esznek, isznak, dolgoznak, a lusták még alszanak. Mint minden rendes napon. De valami furcsát, szokatlant érzek a bolygóközi térben.

A szemem sarkából már látom kedvenc területemet. Egy nagy síkság, hegyek ölelik körül, és két kék vonal szeli át. Az emberek megbolydultak: hosszú kék acélkígyókba igyekeznek minél többen beférni, lógnak ki az ablakokon. Talán megint egy higagyú rekordkísérlet. De nem, ezek komolyan gondolják. Ahhoz a nagy vízhez igyekeznek. Mások meg még messzebbre. Megbolondultak ezek?

És ott egy még furcsább eset. Ezeket ma már láttam egyszer... Ja, a pirosdobozosok! Most megint azt játsszák, amit reggel. Dobozokat be, magukat be és száguldás. Azaz nem. Most hátulról nyomkodják a dobozt.

Közben a kígyósok kiszabadulnak, és szétszóródnak. Egy nagy területen, mintha egy vonalat rajzolnának ki. És egyre többen néznek az égre. Milyen fontos ezeknek ma az ábrázolás...

És a felhőkön át látom, amint a kis piros mozgó doboz megint száguldásba kezd. Biztos vagyok benne, hogy semmiféle földi szabállyal nem törődnek, csak vágatnak. De most elvesztettem őket szemem elől. Mindenhol hatalmas a készülődés. De mire? Emberscsoportok gyülekeznek, és iz-

gatottan kémlelnek felém. Hurrá, újra látom a piros mozgó dobozt. Egyre melegebben tűz a Nap a hátamra, pedig már nem fázom, sőt... Kezdek már mérges lenni rá.

Azt hiszem, a piros száguldó dobozt fogom figyelemmel kísérni. A három piciny alak kipattan, és kivesz egy-két furcsa szemet. Majd nekiállnak megkeresni engem. Jé, talán azt hiszik, hogy bújócskázni akarok, és most ők a hunyók? Mindenesetre folyamatosan engem figyelnek. Mint ahogyan több millió hozzájuk hasonló. És sikítoznak. Micsoda? Első infarktus? Vagy konfliktus? Őszintén mondom, még soha nem álltam ennyi ember előtt. Kicsit elpirultam. Szó mi szó, enyhén lámpalázás vagyok. Ezek meg mit csinálnak? A felhők megint eltakarják őket. De azért még egy kis darabig látom őket. Az egyik beszáll a piros dobozba, a másik kettő pedig tolja. Már megint. Talán ez valamilyen kultikus szokás. Mindenesetre felírom a noteszomba.

Bejegyzés: Primitív technikát használnak, de érdekes. Kis egyedet nyésztenek azért, hogy a mozgó dobozokat tologassák.

Na, ismét száguld a kis piros doboz. Ha jól látom, Dacia van ráírva. Egy csomó másik doboz rohan az utakon. Nagybbrak, kisebbek, mindenféle színűek. Összevissza kanyarognak, mind engem akar látni, de egyik sem lát ettől a felhőtől. Talán ezért száguldoznak.

Bejegyzés: Az emberek feltehetően nem szeretik a felhőket. Vagy lehet, hogy elkapták az eszeveszett vonulás betegségét azoktól a kis állatoktól.

Na, most megáll a Dacia. Utasai megint elővesznek mindent, és felém nézegetnek. Idegesen pakolgatnak. Mintha várnának valamire. A Nap egyre melegebben tűz. Panaszt jelentek be. Ha tudtam volna korábban, nem szegődök ide. Lenn az árnyék egyre tovább vágat. A szigetnél már taposolnak. Na, szép lassan eléri a medencét is. Igen, most... Ismét a háromtagú csapatot nézem. Most még jól látom őket, aztán az árnyék őket is elnyeli. Mintha kiáltoznának. Talán történt velük valami? A szavu-

kat sehogy sem értem. Mintha egy korona lenne rajtam?

Jaj, a Nap! Már megint itt van? Segítség, még megéget! Ismét keresztezi az utamat, és nem tudok kitérni előle. Nemrégiben is ezt csinálta. Ne! Nem akarom! Amint eszébe jut, csak hipp-hopp letámad... Zaklatás! Na, ezt nem engedem többször. Emlékszem, nemrég történt, hogy sikerült úgy megsértenem, hogy elijesztettem és megúsztam a dolgot. Az emberek persze akkor is néztek, valami olyat hallottam, hogy részeges napfogyatkozás. Mi az, hogy a Nap engem meg sem kérdez? Ezek a bugyuta földlakók meg ennek örülnek, megint azzal a fekete szemmel. Boldognak tűnnek. Most leülnek egy asztalhoz, és elkezdnek enni. Mi az, már senki sem kíváncsi rám? Felmondok! Most összekapcsolnak, és beszállnak a dobozukba, majd szép lassan dőcögnek egy nagyváros felé. Talán elfelejtettek száguldozni? Vagy csak elfáradtak? A város környékén szem elől vesztettem őket. Biztosan most is a piros Daciát tologatják.

Hú. Elment végre. Már távolodik tőlem, de még mindig forró. A földiekre is lekerült az árnyék. A kedvenceim abbahagyták a sikoltozást, és elégedetten, bár még kissé felkavartan szemlélnek, megint azzal a fekete szemmel. Boldognak tűnnek. Most leülnek egy asztalhoz, és elkezdnek enni. Mi az, már senki sem kíváncsi rám? Felmondok! Most összekapcsolnak, és beszállnak a dobozukba, majd szép lassan dőcögnek egy nagyváros felé. Talán elfelejtettek száguldozni? Vagy csak elfáradtak? A város környékén szem elől vesztettem őket. Biztosan most is a piros Daciát tologatják.

Címzett: Tejútrendszer Központi Felügyelőbizottság

Tárgy: Áthelyezési kérelem a Solaris rendszerbe.

Indoklás: Eddigi szolgálati idő egymilliárd év, átlagosan évi 1 darab zaklatás a Nap részéről.

Utóhang

A jó öreg Hold némi intergalaktikus rábeszélés után végül úgy döntött, mégis marad. Azért szereti ezt a mi kék bolygónkat.

Mi is szerencsésen hazaérkeztünk Sopronba, és elkezdjük feldolgozni magunkban az élményeket, és persze, nem magunkban, a mérési adatokat. ✨

Idővonalak

1999 óta eltelt 16 év. Arra voltunk kíváncsiak, mi lett a Szereplőkkel: Bacsival, Zitával, a Tanárnővel, és persze a Daciával? A Tanárnőt, Lang Ágotát kérdeztük.

Kezdjük a fenti kaland legnélkülözhetetlenebb tagjával, a piros Daciával. Még öt évig élvezte a kényeztetést a szerkesztőségétől kapott mosókefével-szivaccsal; majd nyugdíjba vonult, átadva a helyét Janikának, „aki” egy fehér Skoda Octavia. Vele új távlatok nyíltak, mert a jó öreg Daciával már nem mertem külföldre menni, na de egy vadiúj autóval? Az első útra természetesen a „tolóembereket” választottam útítársnak, miután becsületszóra megígérttem, hogy most nem kell ilyen műveletet

végezniük. Ez egyfajta öt éves jubileum is volt, hiszen 2004 nyarán indult Janika első nagy útjára, Genfbe. Ugyanis régi álmunk volt, hogy megnézzük a CERN-t, de a fiatalok középiskolás éve alatt nem sikerült ezt megvalósítani. Kis csapatunk Horváth Dórral egészült ki, aki szintén szorgalmasan (és eredményesen) gyártotta a diákpályázatokat.

A CERN-ben Erő János, az ott dolgozó magyar csoport egyik tagja kalauzolt minket. Emlékeztetőül: az LHC főpróbáját 2007



A Sarkkörön



Obszervatórium Ven szigetén



„Janika”, a Skoda



Nordkapp sziklája



A Tanárnő Rotary-díjat kap (2001)

szeptemberére tervezték, így akkor még folytak az alagútban a munkálatok, oda nem tudtunk lejutni. Azonban láthattuk a két nagy detektort: az ALICE-t és a CMS-t a szerelőcsarnokban, vagy hallhattunk érdekességeket, mint pl. a hatalmas tekercset lezáró vas-mag szállításakor meg kellett bontani egy hidat, mert nem fért el alatta. Betekintthettünk a CERN számítógépterembe is, ahol a szakavatottak, a BME-s Bacsí és Zita állá is leesett a hihetetlen mennyiségű komputer láttán. Ezek zömének szerepe azonban csak az adatok tárolása, amíg azok feldolgozásra nem kerülnek a világ valamely pontján. Az LHC működése során 1–1 mérési alkalommal terabyte nagyságrendű adathalmazt termel. Ennyi adat tárolásához azonban már nem elegendő a korábbi számítógéppark, ezért a CERN tárhelyeket „bérel”. Az egyik ilyen adatközpont éppen Budapesten, a MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban található.

2005-ben az előző év sikerén fellelkesülve már hosszabb útra is vállalkoztunk. Az apropót egy KöMaL-feladat adta, amelyben a Nap járását feszegették a sarkkörön és azon túl. Megoldásán próbálkozva besokalltam, és az asztalra csapva kijelentettem Dórinak, hogy ezt megnézzük magunknak. Az előző évi csapatot csak 4/5 részben sikerült összeszednem: Janika, Bacsí, Dóri, én. Zitát nem sikerült fellelkesíteni, így őt Gergőre cseréltük. Az út számokban: 10 000 km, 14 izgalmas nap, átlaghőmérséklet az út során: 10 °C, eső (mérhetetlen mennyiségben), rénszarvasok (minden mennyiségben, városon kívül és városban belül). Csapásirány: Koppenhága–Botteni-öböl–Rovaniemi–Inari–Vardö–Nordkapp – Hammerfest–Alta és innen kanyarodtunk vissza. Az út bővelkedett csillagászati látványokban. A Helsingör és Helsingborg közötti tengerszorosban fekszik egy apró sziget: Ven. Egykori tulajdonosai között találjuk Tycho Brahe nevű urat is, aki volt annyira jó módú, hogy hobbiként csillagászattal foglalkozzon és ehhez a dán királytól egy csendes helyet kérjen. Így kapta meg a szigetet, ahol felépítette az első obszervatóriumot. Igaz, hogy akkor az észlelésekhez még nem használtak távcsövet, de más mérőeszközöket igen; többek között Brahe kvadránsát. Ezekkel az égitestek helyzetét igyekeztek minél pontosabban meghatározni. Hogy a mérést külső hatás ne zavarja, Brahe egy félig a föld alatt lévő építményt állított fel, amelyben asszisztenseivel dolgozott. Szerencsénkre ezt éppen abban az évben hozták helyre, így látogatható volt, egy Brahe munkásságát bemutató kiállítással együtt.

Rovaniemiben sarki fényt is láthattunk az Arktikum múzeumban, előadás formájában (ha már élőben nem, hiszen a le nem menő Napot indultunk megnézni!). Innen már csak pár kilométer az Északi-sarkkör, ahol Joulupukki, a finn Mikulás lakik. Éppen házon kívül volt, így már indultunk is tovább legtávolabb fekvő úti célunk: Vardö felé. Ez ugyancsak egy kisebb sziget, amely így reklámozza magát: Murmanszktól északra, Szentpétervártól keletre – ez mindent elmond a földrajzi elhelyezkedéséről. Hogy miért jutott eszünkbe erre az Isten háta mögötti kis szigetre elautózni?

Mert 2004-ben, a Vénusz-átvonulás kapcsán újból előkerült Hell Miksa és Sajnovics János nevével együtt, akik itt figyelték meg 1769-ben ezt a kb. 100 évenként előforduló csillagászati jelenséget, azzal a céllal, hogy mérési eredményeiből minél pontosabban meghatározzák a Föld-Nap távolságot. Ennek a megfigyelésnek, illetve az itt töltött közel egy évnél az összefoglalásaként két mű született: Hell a mérési eredményeiket publikálta, Sajnovics pedig a Demonstratio című könyvében a lapp és a magyar nyelv közötti hasonlóságot taglalja. A városi múzeum ma is büszkén őrzi emléküket. A szigeten tomboló szél és a felkorbácsolt tengerből érkező permet tipikus világvége hangulatot árasztott, így repülőrajtot vettünk a másik világvégre: a Nordkappra, vagyis az Északi Fokra (71°10'20.95"É, 25°47'8.85"K.). Egy impozáns sziklán fekszik, amely a tengerből mintegy 300 m magasra emelkedik ki. Ezt a helyet Európa legészakibb pontjaként hirdetik, bár az a szomszédos földnyelven található Knivskjellodden, ami 1500 méterrel közelebb fekszik az Északi-sarkhoz. Nordkappon az időjárás miatt világvége hangulatunk csak fokozódott: szürkesség mindenféle, a szélről alig tudtuk kinyitni a kocsiját – de legalább csak szemerkélt az eső. Ezért csak kicsit búsultunk, hogy délután értünk ide, holott a látványosság éjszaka van: a Nap nem megy le a horizont alá, hanem a Jeges-tenger felett „fordul” vissza napi pályájára. Azonban a Nap járása csak nyáridőben, kb. egy hónapig ilyen, aztán itt is visszatérnek a naplementék/napfelkelték.

Aztán mi is visszatértünk otthonunkba. Azóta Bacsí és Zita is mérnök-informatikus diplomát szerzett a BME-n és munkába állt. Zita megbarátkozott a gondolatokkal, hogy északon is van élet, és Oslóban dolgozott hat évig; két kislánya is ott született. Nemrégén tértek vissza Budapestre. Bacsí a kvantumbitekekkel foglalkozik hallgató kora óta. Ezekről hol tudományos előadást tart nemzetközi konferenciákon, hol népszerűsítőket diákoknak. Párhuzamosan dolgozik a BME-n, ahol elsősorban kutat, illetve a NymE soproni Informatikai és Gazdasági Intézetében, ahol elsősorban oktat. Ennek az intézménynek három éve áll az élén, és igyekszik azt hallgatóbaráttá tenni. Emellett a Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) főtítkáráként tevékenykedik, ahol a korábbi diákpályázatot társaival kissé megreformálta, a nyári táborokkal együtt. Olyan, mint az elektron: bárhol előfordulhat a nagyvilágban, kisebb-nagyobb megtalálási valószínűséggel.

Mivel mindketten családosak, ezért a közös utak szünetelnek, de Bacsival folyamatos az együttműködésünk: hol ő segít ki engem az informatikában tehetséges diákok mellé felkészítőt adva, hol én „szórakoztatom” a MANT-tábor résztvevőit, ha éppen Sopron a helyszín.

Janika még meglátogatta Zitát Oslóban, majd a 2012-es Vénusz-átvonulás alkalmával Trondheimig jutott velünk, hogy filmet forgathassunk a Hell-expedíció útjáról. De ez már egy másik történet lesz...

LANG ÁGOTA

A Fény Éve alkalmából kiírt fotópályázat díjnyertes képei



Tóth Ervin: Airbus (1. helyezett)



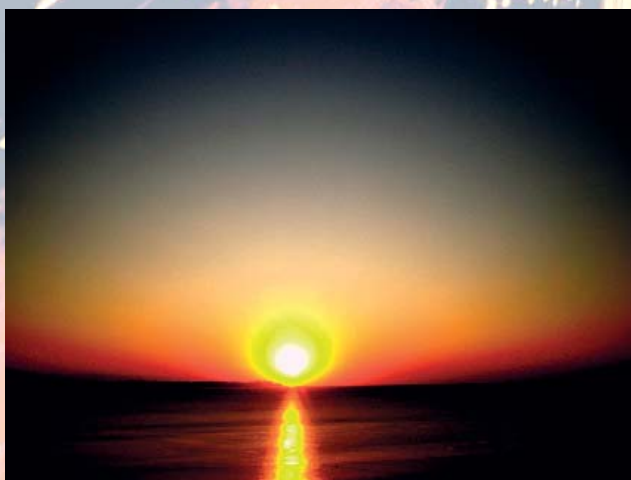
Pintér András: Halo (2. helyezett)



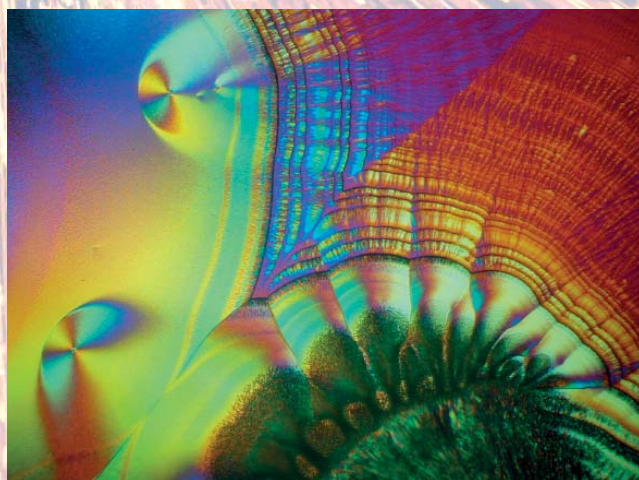
Újfalussy Balázs: Távoli fények (Dicséretet kapott)



Potyó Imre: Fényporszívó (2. helyezett)



Szkordilisz Flóra: Napgömb (3. helyezett)

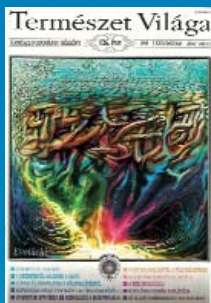


Solymosi Katalin: C-vitamin-kristályok polarizált fénnel
(3. helyezett)

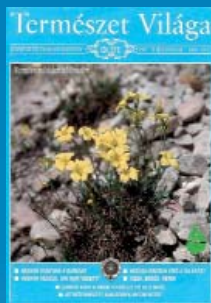
A Természet Világa különszámai

A különszámok ára az utolsó három kivételével egységesen 500 Ft. Korlátozott számban megrendelhetők a Kiadónknál, a Tudományos Ismeretterjesztő Társulatnál (1088 Budapest, Bródy Sándor utca 16. Telefon: 327 8965, fax: 327 8969, e-mail: titlap@telc.hu).

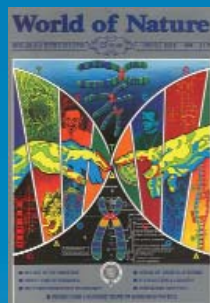
A -tel megjelölt számaink már csak könyvtárakban hozzáférhetők.



Evolúció (1995) 



Természetvédelem (1995) 



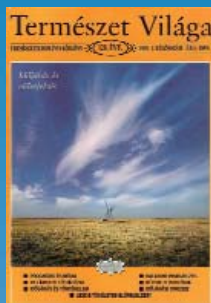
World of Nature (1995)



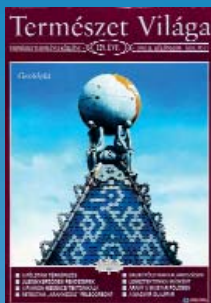
Változások a légkörben és az éghajlatban (1996) 



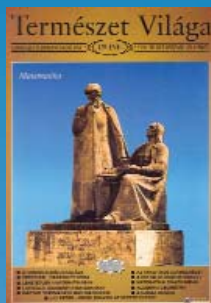
A biológiai sokféleség (1996) 



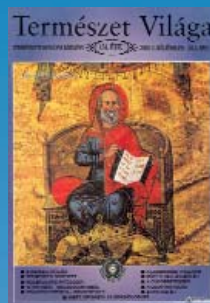
Időjárás és előrejelzés (1998) 



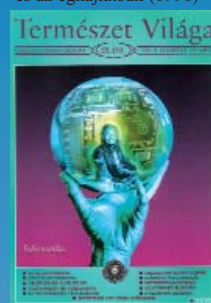
Geológia (1998)



Matematika (1998) 



Orvostudomány (2000)



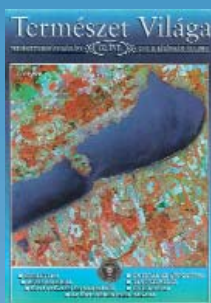
Informatika (2000)



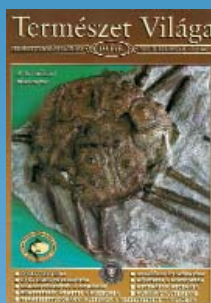
Mikrovilág (2000) 



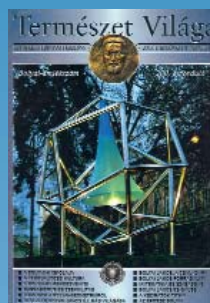
A magyarországi fizika kultúrtörténete (2001, 2002)



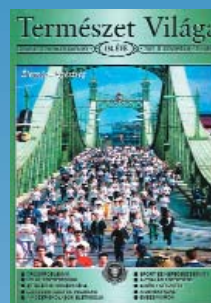
Világűr (2001) 



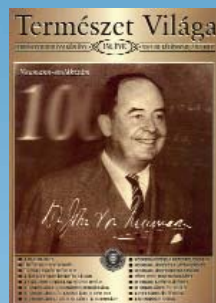
A természet múzeuma (2002)



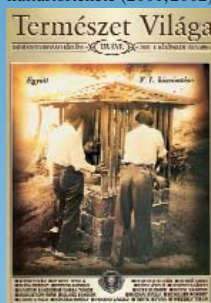
Bolyai-émlékszám (2003)



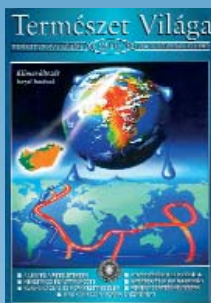
Életmód-Egészség (2003)



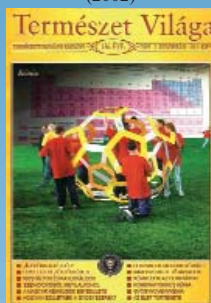
Neumann-émlékszám (2003)



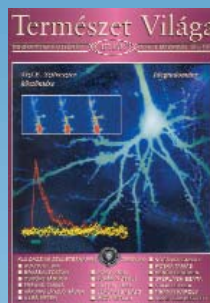
Együtt (2004)



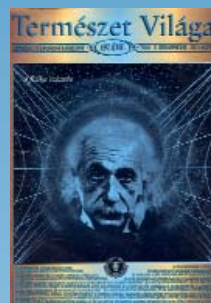
Klimaváltozás (2004) 



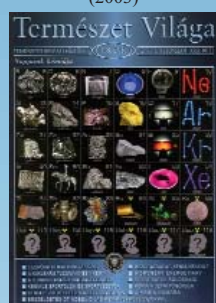
Kémia (2005)



Idegtudomány (2006)



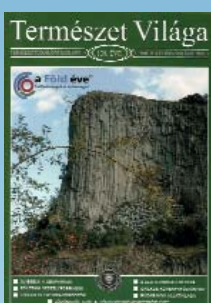
A fizika százada (2006)



Napjaink kémiája (2007)



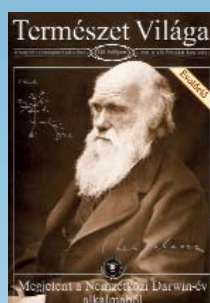
Földközben a világűr (2008)



A Föld éve (2008)



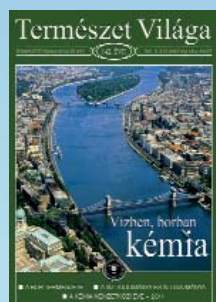
Feltárul a Világegyetem (2009)



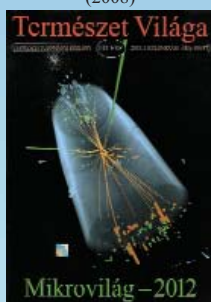
A Darwin-év (2009)



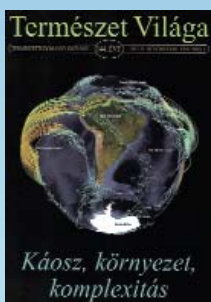
Emberközben a fizika (2011)



Vízben, borban kémia (2011)



Mikrovilág – 2012



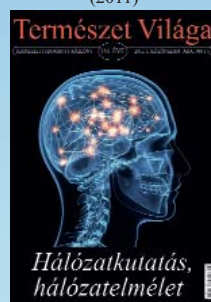
Káosz, környezet, komplexitás (2013)
Ára: 980 Ft



A Kalmár-verseny feladatai (2014) Ára: 980 Ft



Európával a világűrben (2014) Ára: 980 Ft



Hálózatkutatás, hálózatelemzés (2015) Ára: 980 Ft