

# fizikai szemle

2015/7–8

# VAN ÚJ A FÖLD FELETT

*Az elmúlt másfél évtized legfontosabb csillagászati eredményeit összefoglaló, tanórai előadásra is alkalmas segédanyag on-line változata szabadon letölthető a [www.fizikaiszemle.hu](http://www.fizikaiszemle.hu) honlap mellékletek pontjából.*

Nap

A szupernóva-robbanások során a Tejútrendszer korongjára merőleges irányban kilövellő forró gáz nagy energiájú röntgensugárzásának képe

A Nap, ahogy még sohasem láttad.

Nézzed meg!

Mutasd meg másoknak!

Tanítsd meg diákjaidnak!

Töltsed le!

Keresd a [fizikaiszemle.hu](http://fizikaiszemle.hu) mellékletek menüpontjában!



# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

## Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A Kepler-űrtávcső 2009–2013 között egyetlen területről végzett minden korábbinál pontosabb fényességméréseket. Az iránytartást biztosító egyik lendkerék meghibásodása után módosítani kellett az addigi észlelési programot. A K2 névre át keresztelt misszió során 2014 óta háromhavonta új irányban vizsgálódik a Kepler. A kiszemelt látómezők között van olyan, amelyekben egy gömbhalmaz is látszik, egy másikban közeli törpegalaxis figyelhető meg és van olyan is, amelyik a Tejútrendszer centruma felé mutat. A vizsgálható objektumok sokfélesége – a naprendszerbeli kis égitestektől kezdve az exobolygókon át az extragalaktikus változócsillagokig – bőséges kárpótlást jelent a földi lehetőségeket még mindig túlszárnyaló mérési pontosság valamelyes csökkenéséért.

## TARTALOM

Joerg Jaeckel, Axel Lindner, Andreas Ringwald: Ultrakönnyű részecskék nyomában	218
Bakonyi Imre, Tóth Bence, Péter László: Nanohuzalok előállítás	223
Horváth Gábor, Egri Ádám, Blabó Miklós, Barta András, Barta Pál, Horváth Ákos, Karl Bumke, Andreas Macke: Felhőzöttségmérés, optikai felhőfelismerő algoritmusok összehasonlítása – 1. rész	227
Regály Zsolt: Több, mint égen a csillag – 1. rész	233
Borbídi Attila: A paksi erőmű és a környezeti rendszerek között várható kölcsönhatások	239
Fábián Margit: Atomerőművi hulladékok kezelése – 1. rész	241
Buzády Andrea, Szegő Dóra: Millikan és az elemi töltés meghatározásának története – 1. rész	245
Radnai Gyula: Fizikus tehetségpont a két háború között	249
Györgyi Géza (1930–1973): Sugárnyalábok ingadozásai és korrelációja a részecskékép alapján	252
<b>KÖNYVESPOLC</b>	260

## A FIZIKA TANÍTÁSA

Beke Tamás: A nap- és a szélenergia lakossági felhasználási lehetőségeinek modellezése iskolai projektfeladatban	263
Bokor Nándor: Vénusz a hálószobában	270
Varga János: A zsonglörködés fizikája	275
Inczeffy Szabolcs Zsombor: Lissajous-görbék előállítása ferdeszögű rezgések egymásra tevődésével	278
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	258, 281

J. Jaeckel, A. Lindner, A. Ringwald: Detecting ultralight particles

I. Bakonyi, B. Tóth, L. Péter: How nanowires are produced

G. Horváth, Á. Egri, M. Blabó, A. Barta, P. Barta, Á. Horváth, K. Bumke, A. Macke:

The comparison of optical algorithms for measuring cloudiness – Part 1

Zs. Regály: More than the stars on the sky – Part 1

A. Borbídi: Paks Nuclear Power Plant and its surroundings: what interactions are expected?

M. Fábián: How nuclear power plant waste is processed – Part 1

D. Buzády, D. Szegő: Millikan and how he determined the elementary charge – Part 1

J. Radnai: A. Faragó, mentor of gifted young physicists between two world wars

G. Györgyi (1930–1973): Ray bundle oscillations and correlations

## BOOKS

### TEACHING PHYSICS

T. Beke: The use of sun and wind energy as a topic of school problems

N. Bokor: Venus in the bedroom

J. Varga: The physics of jongleurs

Sz. Zs. Inczeffy: Lissajous curves by tilted superposition of oscillations

### EVENTS

J. Jaeckel, A. Lindner, A. Ringwald: Ultraleichten Teilchen auf der Spur

I. Bakonyi, B. Tóth, L. Péter: Die Herstellung von Nanodrähten

G. Horváth, Á. Egri, M. Blabó, A. Barta, P. Barta, Á. Horváth, K. Bumke, A. Macke:

Der Vergleich von optischen Algorithmen zur Messung der Bewölkungsgrades – Teil 1.

Zs. Regály: Zahlreicher als die Sterne am Himmel – Teil 1.

A. Borbídi: Kernkraftwerk Paks und seine Umgebung: welche Wechselwirkungen sind zu erwarten

M. Fábián: Wie werden die Abfälle der Kernkraftwerke behandelt – Teil 1.

A. Buzády, D. Szegő: Millikan und wie er die elementare Ladung bestimmte – Teil 1.

J. Radnai: A. Faragó – Betreuer talentierte Physiker zwischen zwei Kriegen

G. Györgyi (1930–1973): Schwankungen und Korrelation der Strahlenbündel auf Grund und Teilchenbildes

### BÜCHER

#### PHYSIKUNTERRICHT

T. Beke: Die Nutzung der Sonnen- und Windenergie als Thema von Schul-aufgaben

N. Bokor: Venus im Schlafzimmer

J. Varga: Die Physik der Jonglieren

Sz. Zs. Inczeffy: Lissajous-Kurven aus schief überlagerten Schwingungen

#### EREIGNISSE

ВНИМАНИЕ! По техническим причинам русская часть оглавления печатается отдельно на конце журнала.

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



# ULTRAKÖNNYŰ RÉSZECSKÉK NYOMÁBAN

Joerg Jaeckel – Heidelbergi Egyetem

Axel Lindner, Andreas Ringwald – Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY)

*Az új elemi részek, különösen a sötét anyag alkotórészei utáni kutatás eddigi próbálkozásai eredménytelennek bizonyultak. Ezért a fizikusok szokatlan stratégiákat is ajánlanak. Első látásra hibetelenül egyszerű kísérletekkel igyekeznek az ultrakönnnyű axionok és rokonaik nyomára bukkanni.*



2012 júliusában a CERN LHC fizikusainak egy új elemi részecske, a Higgs-bozon megtalálásáról szóló beszámolója a lapok címdalára került. Azon túl, hogy az elemi részek standard modelljének régen keresett utolsó alkotóelemét sikerült megtalálni, a felfedezés bizonyítéka a fizikusok által az új részecskék keresésére javasolt stratégia, az óriásgyorsítók építése helyességének. Azonnal felvetették a még nagyobb energiájú gyorsítók konstrukciójának megfontolását is.

Ez a siker azonban elfedi, hogy az LHC mindeddig adós maradt a megépítéséhez fűződő másik várakozás, a sötét anyag alkotórészei felfedezésének teljesítésével. Az áttörést esetleg meghozhatja a még magasabb ütközési energiák elérése 2015 elején. Az elméleti és kísérleti fejlődés az ellentétes irányban, a szélsőségesen könnyű részecskék keresése irányában is sokat ígér.

Már a Higgs-részecske felfedezése előtt egyértelmű volt, hogy a standard modell a bennünket övező tartományban nagy pontossággal és sikeresen írja le az anyag alapvető szerkezetét. Mindmáig egyetlen laboratóriumi kísérlet sem mutat szignifikáns eltérést a jóslataitól. A kiváló egyezés a Higgs-részecske tulajdonságai tekintetében is meggyőző. Ettől függetlenül a fizikusok keresik a standard modellen túli világ megnyilvánulását, hiszen többek között, a csillagászati megfigyelések szerint a Világegyetem gravitáló anyagának csak 15%-át alkotják a szokásos elemi részecskék. Az anyag oroszlánrészét (85%-át) a sötét anyagnak kell tulajdonítani. Annak alkotórészeiről alkalmasint csak annyit tudunk, hogy igen gyengén hatnak kölcsön a fényvel és a standard modell egyéb részecskéivel. Ennek ellenére a sötét anyag részecskéinek jelenlétét a Világegyetemben nem lehet „megúsni”. A galaxisok, mint a mi Tejútrendszerünk is, a sötét anyag részecskéinek gravitációs hatása eredményeképpen létrejött óriási anyagcsomósodások belsejében alakultak ki.

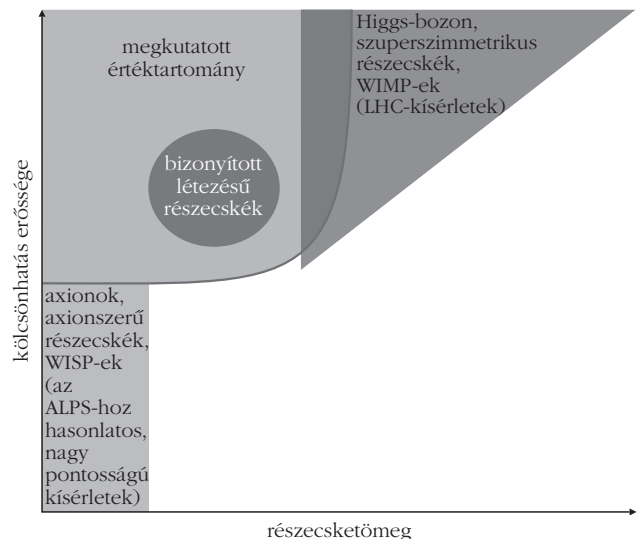
De mi alkotja a sötét anyagot és mi az oka, hogy mindeddig nem akadtunk közvetlenül a nyomára? Két válasz kínálja magát. Az egyik szerint ezek a részecskék

túlságosan nagy tömegűek, a másik szerint csak igen ritkán lépnek kölcsönhatásba a szokásos kozmikus anyaggal. Ha nincs szerencsénk, akár mindkét tulajdonsággal rendelkezhetnek. Az extrém nagy tömegű részecskék létéről extrém nagy energiájú folyamatokban lehet meggyőződni. Az egyéb anyagokkal alig kölcsönható részecskék kimutatására extrém találmányosságú precíziós mérésekre van szükség. Nem valószínű, hogy a két követelménynek egyidejűleg eleget lehet tenni laboratóriumi mérésekben.

## Vadászat a „félénkekre”

Az utóbbi két évtizedben a részecskefizikusok a néhez részecskékre koncentráltak. Az elméletek közül az úgynevezett szuperszimmetrikus elméletek fejlesztésével foglalkoztak, amely a standard modellen túl részecskék egész rajának létezését jósolják, köztük kifejezetten nagytömegűeket. Az LHC építésének megkezdése is azzal kecsegtetett, hogy a teraelektronvoltos energiatartományba eső részecskék létezése kísérletileg igazolható lesz. A kutatók szemében különösen vonzónak tűnt az úgynevezett WIMP-ek (magyar fordításban „gyengén kölcsönható nagytömegű részecskék”) felfedezésének esélye. A rövidítés beszélő névvé változott, mivel „wimp” az amerikai angolban „félénk embert” jelent (1. ábra).

1. ábra. Hol kereshetők az ismeretlen elemi részecskék? A viszonylag kis tömegek és erős kölcsönhatások tartományát már elég alaposan átkutatták (ezt mutatja a bal felső terület). Az LHC-nál és más nagyenergiás kísérleteknél a kutatók nagy tömegű ismeretlen részecskéket, köztük WIMP-eket keresnek (a jobb felső tartomány). Egyre nő azon kísérletek száma is, amelyek a bal alsó tartományt kutatják át WISP-ekre vadászva. Ezek a WIMP-ekhez hasonlóan a sötét anyag lehetséges alkotórészei.



A 2015. évi Marx György emlékelőadás témáját feldolgozó cikket az előadó, A. Ringwald professzor és a *Spektrum der Wissenschaften* folyóirat szerkesztősége bocsátotta a *Fizikai Szemle* rendelkezésére. Az eredeti, német nyelvű cikk 2014 júniusában jelent meg. Fordította Patkós András.



A sötét anyagot alkotó részecskék között továbbra is a WIMP-eket tekintik a legfontosabb jelölteknek, bár az elérhető energiatarományban nem adtak jelet létezésükről. Talán az LHC ez évtől megemelt energián működő 27 km-es kerületű gyorsító gyűrűjében nyomukra akadnak.

A gyorsítós megközelítés mellett a fizikusok a kozmoszban is kutatnak WIMP-ek után. Ezzel a feladattal föld alatti detektorok sorát építették, amelyek a LUX, XENON, DAMA és COGENT neveket viselik, ám mindeddig nem jutottak meggyőző bizonyítékokra. Némelyikük látni vél bizonyos jeleket, de az egyes detektorok összehasonlításában a jelzések ellentmondásosnak bizonyultak.

Mindezek miatt eljött az idő, hogy mintegy az előzőek kiegészítésére, ultrakönnnyű részecskék kutatásával is foglalkozzanak. Ilyen kísérleti program példája az USA-ban megvalósított Axion Sötét Anyag Kísérlet (Axion Dark Matter Experiment – ADMX). Az elméleti fizikusok is egyre határozottabb előrejelzéseket képeznek kiolvasni modelljeikből. A sötét anyag könnnyű alkotórészeire javasolt jelöltek listája elég hosszúra nőtt. Ezekre a részecskékre a WISP rövidítés az elterjedt szakmai megnevezés, ami szintén beszélő megnevezés, hiszen „wispy” a könnnyed vagy a leheletszerű szavakkal fordítható magyarra (WISP – weakly interacting slim particles – gyengén kölcsönható karcú részecskék). Ezek a részecskék sokban emlékeztetnek a neutrínókra, amelyeket sokáig a sötét anyag fontos jelöltjeinek tartottak. Ám kiderült, hogy a kozmikus neutrínók nagyenergiájú folyamatokban keletkeznek és túl gyorsan átszáguldanak az Univerzumon, semhogy hatásosan részt vehetnének a galaxisok kialakulásában. A WISP-ek ezzel szemben igen lassú mozgásúak és így ideális csirái lehetnek a nagyobb tömegcsomósodásokhoz vezető nehézségi erőtöbbletnek.

A talán legjobban megértett WISP-jelölt az axion, amelynek feltételezett tulajdonságaival már több mint 20 éve foglalkoznak a kutatók. Az axion létezésére vonatkozó javaslat megszületésének megértéséhez egy kis kitérőt kell tenni.

Az elemi részek fizikája majdnem teljes egészében szimmetriaelvekre épül. Ezen elvekből következtek a hatóerőkre és megmaradási tételekre is. Például az energia megmaradásának közismert törvénye a fizikai törvények időfüggetlenségének következménye. Ez konkrétan azt jelenti, hogy egy most elvégzett kísérlet és annak akármikor a jövőben elvégzett ismétlése kötelezően ugyanarra az eredményre vezet. Ez a fizika egyik legalapvetőbb összefüggése, amelyet a 20. század elején *Emmy Noether* fizikus és matematikus ismert fel.

Az axion létezése az időhöz kapcsolható másik szimmetriával függ össze, az idő előjelének megfordításával, az időtükrözéssel. Az időtükrözésre szimmetrikus fizikai törvényeket annak alapján ismerhetjük fel, hogy egy fizikai folyamatról készült filmet visszafelé levetítve olyan folyamatot látunk, amelynek bekezdését a szóban forgó fizikai törvény szintén

lehetségesnek mutatja. Ha egy megfigyelőnek csak a filmet mutatjuk, nem tudja eldönteni, melyik irányban telt az idő. Ennek egy hétköznapi példája a film, amely két egymással labdázó személyről készült. Ha csak a két személyre koncentrálunk (és a filmen látható környezetüktől eltekintünk) nem dönthető el, hogy előre vagy hátrafelé forog a filmszalag. Ám az idő előjelének megfordítására a makroszkopikus események általában nem változtatlanok, miután energiájuk egy része az idő előrehaladásával hővé alakul. Például egy pattogó gumilabda egyre alacsonyabbra pattan fel, amelynek megfigyelésével az idő iránya egyértelműen megállapítható.

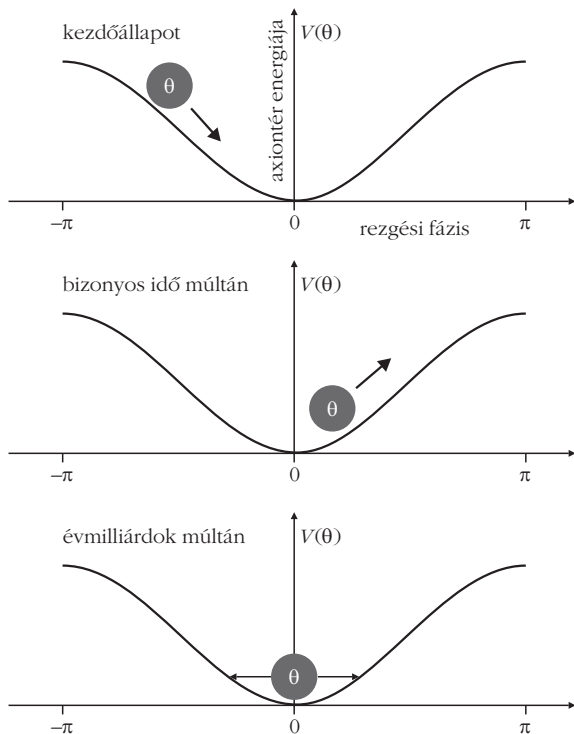
## Az erős kölcsönhatási erő nem sérti az időtükrözési szimmetriát

Az időtükrözési szimmetria a standard modellben is szerepet kap. Az általa leírt három elemi kölcsönhatás közül az elektromágnesesről bebizonyították, hogy az időtükrözésre szimmetrikus. Ezzel szemben mind a gyenge kölcsönhatási, mind az erős kölcsönhatási elméletben van olyan paraméter, amelynek megválasztásától függ, hogy a kölcsönhatás sérti-e ezt a szimmetriát. Nulla értéke esetén a kölcsönhatás változatlan az idő előjelének megváltoztatására, egyébként bekövetkezik a szimmetria sérülése. A meglepő, hogy a gyenge kölcsönhatás elméletében a szimmetria sérül, az erős kölcsönhatásban pedig nem. Azért furcsa ez, mert nem világos, hogy a kvarkok, amelyek mindkét kölcsönhatásban részt vesznek, miért nem viszik át a szimmetriasértést a gyengéről az erős kölcsönhatásra.

Erre a felvetésre mindeddig a legelegánsabb választ az 1970-es évtized végén *Roberto Peccei* és *Helen Quinn* adta. Azt vizsgálták, mi történne a részecske-mentes vákuum energiájával, ha az időtükrözési szimmetriát sértő paraméter értéke nullától különböző értékeket vehetne fel. Arra a meglepő következtetésre jutottak, hogy amennyiben a paraméter időben változhat, akkor valamely idő elteltével energetikailag olyan állapot alakulna ki, amelyben az erős kölcsönhatás eredményeként a szimmetriasértő paraméter értéke nullára áll be.

Két Nobel-díjas, *Steven Weinberg* és *Frank Wilczek* hamarosan felismerték e mechanizmus egy kikerülhetetlen következményét. Egy dinamikailag változó paraméter maga is gerjeszthető és gerjesztései részecskéként viselkednek. Ez hasonló ahhoz, ahogy az elektromágneses tér gerjesztései a részecske jellegű fotonok. Tehát Peccei és Quinn megfontolásainak következménye egy új részecske létezése is, amely részecskének Wilczek, eléggé el nem ítéhetően, egy amerikai mosószer, az axion nevét adta. Indoklásnak az hozható fel, hogy az axion mintegy „megtisztítja” a nukleáris erőt az időtükrözés szimmetriáját sértő paramétértől.

Az axion tulajdonságait szinte teljes mértékben meghatározza az elmélet. Az egyetlen szabad paramé-



2. ábra. Amennyiben az axionrészecskék léteznek, akkor azok a  $\theta$ -val jelölt axionmező kvantumai. Közvetlenül az Ősrobbanás után e tér energiája nagyon nagy volt (legfelső ábra), amit követően a mező az energia minimuma felé fejlődött. Ám a potenciálgödör túloldalán majdnem újból elérte a kiindulási energia nagyságát (középső ábra). A rezgésében tárolt energia nagyságával arányban van az Univerzumban található axionok sűrűsége. Ma, az Ősrobbanás után 14 milliárd évvel csak egy kis amplitúdójú oszcilláció maradt vissza (alsó ábra). De ez még mindig köbcéntiméterenként kerekén egymilliárd axion jelenlétére elegendő energiát hordoz a Tejút tartományában.

ter az axiont jellemző energiaskála. Ez a skála meghatározza az axion tömegét is, továbbá az axion és a standard modell részecskéi közötti kölcsönhatás erősségét is. Minél nagyobb a kölcsönhatást jellemző energiaskála, annál kisebb az axion tömege és annál gyengébb a kölcsönhatás is.

A laboratóriumi kísérletekből és a csillagászati mérésekből egyaránt az derült ki, hogy az axionok hatásának jellemző energiaskálája nagyobb  $10^9$  GeV-nél, azaz az LHC energiájának százezerszeresénél. Ehhez jellemzően az elektronvolt század és milliomod része közötti tartományba eső tömeg tartozik, ami viszont az elektron tömegének nagyjából milliárdod része. Tehát az axion ultrakönnyű, azaz a WISP-ek tipikus példánya.

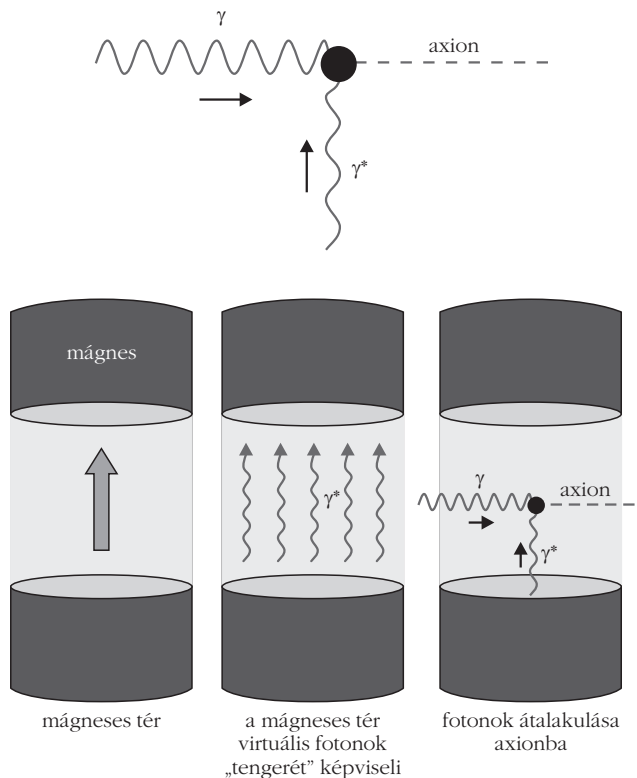
## Az axiontér a minimumhoz tart

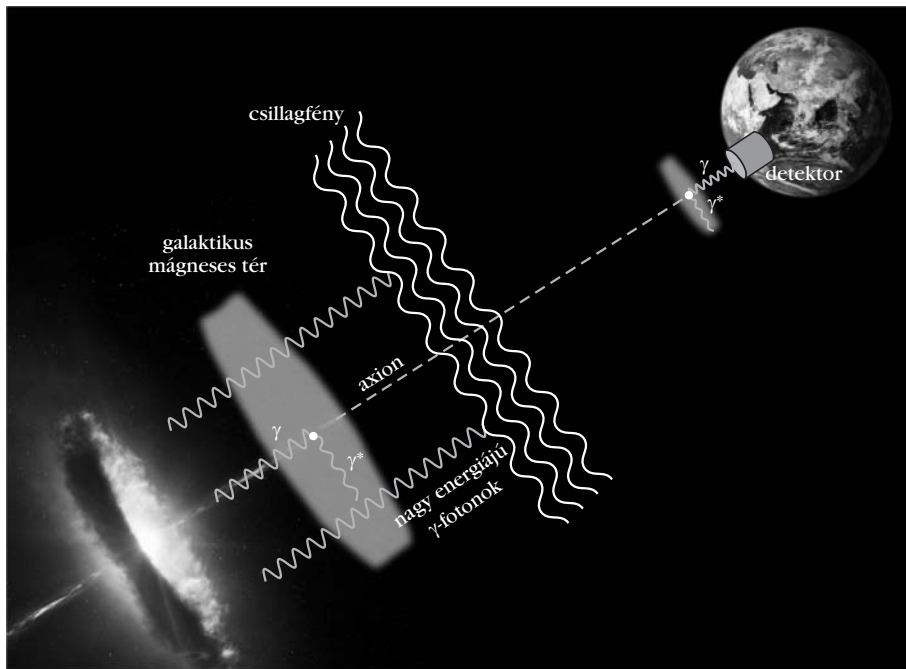
Ahhoz, hogy az axion a sötét anyag lényeges alkotórésze legyen, az szükséges, hogy elég nagy koncentrációban legyen megtalálható. Milyen mechanizmus vezethet ilyen helyzetre? Vegyük szemügyre a korai, nagy energiasűrűséggel jellemzett forró Univerzumot! Ha az axiontér valóban létezik, akkor ebben a korai szakban nagy energiával jellemzett állapotban találha-

tó, egyben a nullától különböző átlagértékű állapota sérti az időtükrözési szimmetriát. Miközben az Univerzum lehűl, minden alrendszerének energiáját igyekszik minimalizálni. Az axiontér, amelyet matematikailag egyetlen számparaméterrel,  $\theta$ -val jellemeznek, szintén az energia minimuma által kijelölt értéke felé tart. Mozgása természetesen nem áll le a  $\theta = 0$  pontban, hanem túllő a célján és a minimum túlsó felén újból növekvő energiájú állapotokba jut. Úgy mozog mint egy golyó egy emelkedő oldal falú tálban. Azután visszafordul és a másik oldalon lendül túl (2. ábra).

E rezgés energiája szorosan összekapcsolódik az Univerzumban ma megtalálható axionrészecskék számával. Az Univerzum tágulásának hatására az axiontér rezgése csillapodik. A csillapodás ütemét az Univerzum anyagának sűrűsége határozza meg. Ez még 14 milliárd évvel az Ősrobbanás után is akkora, hogy az oszcillációban megmaradt energia kiadhatja a sötét anyag jelentős részét. Bár tömegük kicsi, de nagyon nagy számuk révén mód van a sötét anyag szerepének eljátszására. Galaktikus környezetünk minden köbcéntiméterében átlagosan több, mint egy milliárd axionrészecske lenne található.

3. ábra. Felül: az axionok és az axionszerű részecskék, az úgynevezett ALP-ok külső elektromágneses térben ( $\gamma^*$ ) át tudnak alakulni fotonná és vissza. Alul: a szinusz jellegű vonalak az ábrában a fotonoknak felelnek meg. Ezek a fotonok nagyon rövid élettartamú, azaz virtuális fotonok ( $\gamma^*$ ), a szaggatott vonal pedig az axionra utal. Az ábrásort balról jobb felé olvasva, mintha két foton találkozásakor egy axion keletkezne. Az egyik foton egy erős lézerből származik, az érdektelenebb virtuális foton a mágneses tér szolgáltatja. A mágneses térerőt nagyszámú virtuális foton alkotta „tenger” jelenlétével lehet értelmezni. A harmadik magyarázó ábra a laboratóriumi kísérletek jellemző elrendezését mutatja, amelynek során a laboratóriumban keltenek axiont. Az ábrát ellenkező irányba is lehet olvasni, ami az axionok fizikailag szintén megengedett bomlásának felel meg.

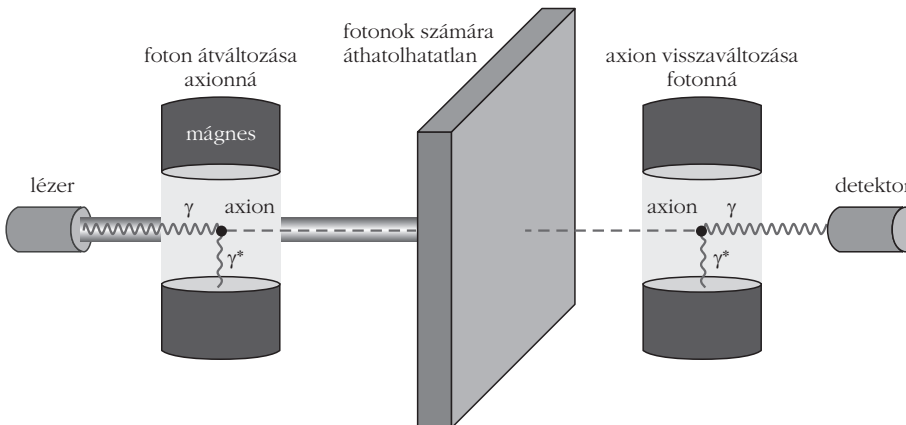




4. ábra. Nagyenergiájú fotonok az aktív galaxismagokból ritkán jutnak el a Földre. Ugyanis útközben a szokásos csillagfény fotonjaival kölcsönhatásban elektron-pozitron párrá alakulnak. Am néhányan „varázssapkát” öltve mégis átkelhetnek az Univerzumon. Erős galaktikus mágneses térben axionokká alakulva kölcsönhatás nélkül tehetnek meg óriási távolságokat. Amennyiben a Föld közelében bekövetkezik visszaalakulásuk fotonná, akkor ezt a nagyenergiás fotont észlelni lehet.

Tehát a WISP-ek létezésére elég jó elméleti alapokat ismerünk, de létezik-e bármiféle kísérleti jelzés, ami ugyancsak erre utal? Bizonyos asztrofizikai megfigyelések akár így is értelmezhetők. Feltűnő például a távoli galaxisokból hozzánk elérő nagyenergiájú fotonok áramának valószínűtlenül nagy értéke. Miután az aktív galaxismagokban vagy neutroncsillagokban szélsőséges körülmények között ilyen fotonok keletkeznek, az úrben megtett útjuk során kölcsönhatásba léphetnek az átlagos csillagok fényét alkotó kisebb energiájú fotonokkal (3. ábra, felül). Azonban ennek során általában elektron-pozitron párrá – és nem axionná(!) – alakulnak, így annak a legnagyobb az esélye, hogy nem érik el a Földet.

5. ábra. Az ALPS jellegű kísérletben a DESY kutatói lézert fényt irányítanak egy átlátszatlan falra. A fal előtt a fényrészecskék egy mágneses térben haladnak keresztül, amelynek során a lézert fény egy fotonja ( $\gamma$ ) a mágneses tér egy virtuális fotonjával ( $\gamma^*$ ) axionná alakul. Ez áthalad a falon, ami mögött újfént észlelhető fotonná ( $\gamma$ ) alakul. Mindkét átváltozási folyamat igen kis valószínűségű. Ennek megfelelően trükkösen tervezték meg ezeket a kísérleteket.

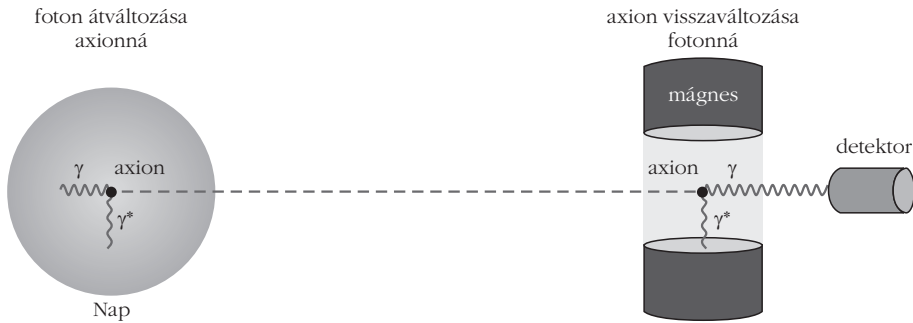


A legújabb megfigyelések szerint azonban a csillagfény egyáltalán nem áll olyan áthatolhatatlan „falként” a nagyenergiájú fotonok útjába, amilyent a számítások jeleznek. A WISP-ek erre a rejtélyre egyszerű megoldást kínálnak. Bizonyos körülmények között a fotonok átalakulhatnak könnyű axionszerű részecskékké, majd a Föld közelében visszaalakulnak fotonná. Útjuk során a WISP-ek nevékhöz híven a fotonoknál sokkal gyengébben hatnak kölcsön a csillagfényvel, azaz intenzitásuk nem csökken a szokásos elektrodinamikai számításokat követve. A WISP a foton láthatatlanná tevő egyfajta „varázssapka” (4. ábra).

Még inkább spekulatív a Naphoz hasonló csillagok végállapotának, a fehér törpe csillagoknak hűlésére vonatkozó mérések során fellépő ellentmondás „magyarázata”. Ezek a csillagok ugyanis – a megfigyelések szerint – a csillagok elfogadott elméletéből számítottnál gyorsabban hűlnek, ami valami járulékos sugárzás jelenlétével lenne magyarázható. Egyes elméleti fizikusok szerint ez a sugárzás akár WISP-sugárzás is lehet, amely alig ütközve, energiavesztés nélkül szállíthat el energiát a fehér törpe magjából.

A fenti szerepek által megkövetelt kis kölcsönhatási intenzitás azonban nem lehet kisebb a sötét anyag alkotórészétől elvárt kölcsönhatási erősségnél. A különböző folyamatokhoz igényelt kölcsönhatási képességet csak az egyes folyamatok részleteinek kidolgozása után lehet megbízhatóan megbecsülni, ami még sok elméleti és megfigyelési munkát követel.

Eközben laboratóriumi körülmények között is meg kell kísérteni e részecskék előállítását és vizsgálatát. Ehhez olyan kísérleteket kell tervezni, amelyekben a megfigyelni kívánt események szélsőségesen ritkán következnek be. Például a fotonoknak axionba történő oda- és visszaalakulása nagyon kis valószínűséggel megy végbe. A szerzők közül ketten (Linder és Ringwald) olyan kísérletet fejlesztenek a DESY laboratóriumában, amelyben fényt kívánnak észlelni egy, a fotonok számára teljesen átlátszatlan fal mögött (5. ábra).



6. ábra. A Nap belsejében uralkodnak a legkedvezőbb viszonyok az axionok keltésére. A fény-afalon-át kísérletektől eltérően a CERN-ben épített CAST-hoz hasonló kísérletek a napaxionok detektálható fotonokká történő visszaalakítására koncentrálnak az erőforrásaikra.

Ez az ALPS-kísérlet (Any Light Particle Search). Intenzív lézertér vezetnek erős mágneses térbe (5. ábra) és abban bíznak, hogy a lézertér egy fotonja a mágneses mezőt alkotó virtuális fotonok egyikével kölcsönhatásba lép és axionná alakul. Ezt a fal nem tartóztatná fel. A fal mögött újra erős mágneses térbe lépve az előbbi kölcsönhatás fordítottja bizonyos valószínűséggel újra fotonná alakítja az axiont, amit azután detektálni lehet. Arról lehet felismerni, hogy a „jó” fotonról van szó, hogy energiája és polarizációja a falhoz érkező lézertér fotonjaival azonos lesz. Ezen az elven más WISP-eket is lehet keresni.

Ez a kísérlet annál jobban működik, minél nagyobb a másodpercenként érkező fotonok száma. A DESY-nél folytatott ALPS-I kísérlet jelenleg a leghatékonyabb a műfajában. A túlsó oldalon akkor is felismeri a megfelelő fotont, ha 100 másodpercenként jön egy. Egy 1 kW teljesítményű lézertől körülbelül  $10^{24}$  foton érkezik ez alatt az idő alatt. Ha minden 1000 milliárdból egy átalakul axionná, akkor a túloldalon egy milliárd axion halad, amelyből azt remélik, hogy egy visszaalakul fotonná.

Az ALPS-I kísérlet része egy bonyolult optikai rezonátor is, amelynek révén a lézertér a fal előtt sokszor oda-vissza verődik. Ennek révén a fotonok újra és újra átfutnak a mágneses téren, ezzel megsokszorozva az axionná alakulás esélyét. E tükrözési trükkkel a 4 wattos lézertér a 1200 W teljesítményű lézertér fotonnyalábjának fényerejével válik egyenértékűvé.

Végül, a most építés alatt álló ALPS-II érkezik majd el abba a tartományba, ahol remény van az új részecskék megtalálására. Ez a berendezés egy 150 kW teljesítményű lézertérrel fog dolgozni, amelynek nyalábját 20 mágnesből álló rendszerrel létrehozott mágneses téren vezetik át. Ezen kívül – speciálisan ehhez a kísérlethez – egy nagy érzékenységű szupravezető foton-detektort is terveztek, továbbá az ALPS-II-ben is alkalmaznak a rezonátortükröt. Mindezek révén az ALPS-II olyan részecskéket is képes észlelni, amelyek ezerszer gyengébben hatnak kölcsön az anyaggal, mint amit az ALPS-I képes kimutatni. Az első próbaméréseket 2015-re tervezik, a teljes üzem 2018-ra indul be. A feltételezett asztrofizikai csodasapka létezése ekkor eldőlné: ha az axion az asztrofizikai nagyenergiás-foton-többlet magyarázatához feltételezett paraméterekkel rendelkezik, akkor az ALPS-II mérése pozitív eredményt hoz.

## Lehet, hogy a Nap az ideális helyszíne az axionok keltésének?

Még érzékenyebbek azok a kísérletek, amelyeknél nincs szükség a fenti folyamat első felére, azaz a fotonok WISP-be alakulásának előidézésére. Helioszkópoknak hívják azokat az eszközöket, amelyekkel a Napban keletkező WISP-ekre vadásznak a kutatók (6. ábra).

A WISP-keltésre különösen kedvezőek a feltételek a Napban, ahol megszámlálhatatlan foton nyüzsög erős elektromágneses térben. A Nap magjából az ott keletkező WISP akadálytalanul jut el a laboratóriumba, ahol így csak az előző kísérlet második felét kell megvalósítani. A jelenleg létező legjobb helioszkóp a CERN Axion Solar Telescope (CAST) nevet viseli. 2020-tól pedig megkezdheti működését az International Axion Observatory (IAXO).

A világűrben nagyszámú axion ér el bennünket, ha valóban ezek alkotják a sötét anyag jelentős részét. Ezek észlelésére a helioszkópoknál jóval érzékenyebb eszközökre van szükség. A leginkább előrehaladott kísérletet, amely a világűr axionjainak észlelését tűzte ki céljává, jelenleg a University of Washington ADMX rövidítésű (Axion Dark Matter Experiment) kísérlete képviseli Seattle-ben. Európában a már említett IAXO lehetőségeit vizsgálják a világűr axionjai észlelésére.

Zárásul le kell szögezni, hogy a legtöbb kutató véleménye szerint a sötét anyagot nehéz részecskék alkotják. De arra is elég jó érvek vannak, hogy a sötét anyag alkotórészei között nagyon könnyű, gyengén kölcsönható részecskéket is találhatunk.





A nanotechnológiai kutatások egyik aktuális témája jelenleg a *homogén mágneses nanobuzalok*, illetve a hosszuk mentén modulált összetételű mágneses/nem-mágneses, úgynevezett *multiréteges vagy multiszemcsés nanobuzalok* vizsgálata. Előbbiek a mágneses információtárolás, utóbbiak a spintronika, illetve egyes biológiai alkalmazások szempontjából fontosak, ezért kutatják intenzíven ezen nanohuzalok mágneses és magnetotranszport sajátosságait. Nanohuzalokat egyszerűen és hatékonyan szabályos nanoméretű pórusokat tartalmazó *nanosablonok* segítségével lehet előállítani, mégpedig kizárólag a nanopórusokba történő elektrokémiai leválasztással.

Kutatócsoportunk az elmúlt években a Hamburgi Egyetemmel folytatott együttműködés keretében kapcsolódott ezekbe a vizsgálatokba, amiből nemrégiben már született egy közös közlemény [1]. Miután az együttműködés során megteremtettük az infrastruktúrális feltételeket és elsajátítottuk a szükséges tapasztalatokat ezekhez a kutatásokhoz, tervezzük a megkezdett munka folytatását. A jelen dolgozatban a nanohuzalok előállítási módszerét kívánjuk bemutatni, beleértve a nanohuzalok készítéséhez szükséges nanosablonok előállításának ismertetését is. Előtte azonban egy rövid történeti áttekintést adunk arról a folyamatról, amelynek során ezekhez a speciális nanoszerkezetekhez eljutott az anyagtechnológia.

## A nanotechnológia kialakulása

Az „óriás” mágneses ellenállás (angolul: giant magnetoresistance, GMR) felfedezéséért odaítélt 2007. évi fizikai Nobel-díjról a *Fizikai Szemlében* írt cikkünkben [2] már idéztük a szintén Nobel-díjas *Feynman* egy 1959-es előadását [3], amelyben megjósolta, hogy „ha majd az anyagok előállítását atomi szinten leszünk képesek manipulálni, akkor az anyagtulajdonságoknak a jelenleginél jóval szélesebb skálája fog feltárulni előttünk és előre nem várt fizikai jelenségeket fedezhetünk fel”. A jóslat időpontjától azonban még hosszú időnek kellett eltelnie ahhoz, amíg valóban sor kerülhetett arra, hogy az anyagokat előállítsuk során – a Feynman által elképzelt módon – atomi szinten legyünk képesek manipulálni.

A vékonyréteg-technológiák közül különösen az epitaxiális rétegnövesztés terén elért haladás volt döntő jelentőségű, mert ezáltal valóban az atomi rétegenkénti anyagkészítést lehetett megvalósítani. Az eredetileg a félvezető-technológia számára kidolgozott mo-

lekulasugaras epitaxia (angolul: molecular beam epitaxy, MBE) segítségével már az 1970-es évek végétől lehetségessé vált igen kis hibasűrűségű fémes rétegek növesztése alkalmasan megválasztott egykristály hordozón, akár nanométeres vastagságban is (az MBE-módszerről lásd a *Fizikai Szemlében* korábban megjelent munkát [4]). Ezen kifinomult rétegnövesztési eljárások révén az 1980-as években lehetővé vált nanométeres rétegekből felépülő multirétegeket is készíteni, amelyek például váltakozva néhány atomsor vastagságú ferromágneses (FM) és nemmágneses (NM) rétegekből állnak. Az ilyen nanométeres multirétegeken végzett kutatások vezettek el végül a GMR-effektus felfedezéséhez [2].

Ezzel a fejlődéssel párhuzamosan folyt egy másik irányú kutatás is olyan tömbi anyagok előállítására, amelyekben a szemcseméret (kristallitméret) néhány nm-től 100 nm-ig terjed, ezek a *nanokristályos anyagok*. A kolloidkémiaiban már mintegy száz éve ismertek voltak eljárások ilyen méretű részecskék előállítására, így készülnek például a jól ismert ferrofluidok mágneses részecskéi (többnyire ferritszemcsék) is. A fizikusok és az anyagtudománnyal foglalkozó kutatók érdeklődése azonban *Gleiter* és munkatársainak a munkássága [5] nyomán fordult a nanokristályos anyagok felé. Fémeket elpárologtatva nemesgázban *Gleiterék* néhány nanométer méretű fémszemcséket állítottak elő, amelyeket vákuumban kompaktálva készítették nanokristályos fémeket és ötvözeteket. Ezekről az anyagokról is megjelent egy írás a *Fizikai Szemlében* 1993-ban [6].

A fent ismertetett két technológia révén kétdimenziós (nanométeres multirétegek) és háromdimenziós formában (tömbi nanokristályos anyagok) az 1990-es évek elejére előállíthatók voltak olyan nanofázisú fémes anyagok, amelyekben vagy a kémiai összetétel, vagy valamely anyagjellemző (sűrűség, kristályszerkezet, szemcseorientáció, elektromos vezetőképesség, mágnesezettség, mágneses anizotropia) 1–100 nm közötti távolságon ( $d$ ) belül véletlenszerűen fluktuál vagy rendszeresen ismétlődően változik. Ennek az a jelentősége, hogy számos fizikai tulajdonság éppen ebbe a tartományba eső karakterisztikus hosszal ( $\lambda$ ) jellemezhető (például vezetési elektronok szabad úthossza, szupravezetés koherenciahossza, mágneses doménfal vastagsága, átlagos diszlokációtávolság) és emiatt  $d > \lambda$  és  $d < \lambda$  esetén lényegesen eltérő anyagtulajdonságok várhatók. Tipikus példaként említhetjük a GMR-effektust [2], ami a megfelelő vastagságú FM- és NM-rétegekből felépülő FM/NM multirétegekben ezen okok miatt lép fel, de ez a jelenség az úgynevezett granuláris mágneses fémekben is megfigyelhető, amelyek nemmágneses fémes mátrixba ágyazott nanométeres szuperparamágneses (SPM) részecskékből állnak [7].

Jelen munkát az OTKA támogatta a K 104696 pályázat keretében. Nagy Ildikó B.Sc. hallgató (ELTE TTK) aktívan közreműködött az AAO nanosablonok előállításában, amiért ezúton mondunk köszönetet.

Mindezekről függetlenül és mindezekkel párhuzamosan az 1990-es évek elején más oldalról megteremtődtek a feltételei annak is, hogy nanoméretű egydimenziós anyagokat, *nanohuzalokat* lehessen előállítani. Erre az adott lehetőséget, hogy korábban 100 nm körüli átmérőjű hengeres pórusokat tartalmazó membránokat fejlesztettek ki szűrési célokra. *Martin* és munkatársai (köztük a magyar származású *Hornýák Gábor*) [8] ezekbe a hengeres nanopórusokba elektrokémiai úton fémeket választottak le (főleg arany nanohuzalokat, amelyek optikai tulajdonságait vizsgálták a méret függvényében). Az első összefoglaló munkák nanohuzalok előállítására nanopórusos membránok segítségével, amit sablontechnikának is szoktak nevezni, *Martin* [9], illetve *Masuda* és *Fukuda* [10] nevéhez fűződnek.

A nanohuzalok elektrokémiai előállításának lehetősége természetesen hamar felkeltette a GMR-effektussal foglalkozó kutatók érdeklődését is. 1993-ban *Schwarzacher* és munkatársai [11] demonstrálták, hogy elektrokémiai módszerrel is lehet készíteni olyan minőségű multirétegfilmeket, amelyek mutatják az addig csak fizikai módszerekkel előállított FM/NM multirétegekben megfigyelt GMR-effektust [2, 11]. Az elektrokémiai multiréteg-előállítás során általában egyetlen fürdővel dolgoznak, amely tartalmazza mind az FM-, mind az NM-fém ionjait és megfelelően megválasztott amplitúdójú és hosszúságú áram- vagy potenciálvezérelt impulzusokat alkalmazva váltakozva lehet leválasztani az NM- és az FM-rétegeket (az utóbbi kis mennyiségben mindig tartalmaz NM-atomokat is). Az elmúlt két évtizedben intenzív kutatás folyt ezen a területen, többek között a mi csoportunk aktív részvételével. A GMR-effektust mutató elektrolitikus multirétegfilmeken végzett kutatásokról írt összefoglaló munkánkban [12] az eljárás további részletei és az elért eredmények is megtalálhatók.

Miután a GMR-effektust mutató multiréteges filmek elektrokémiai előállítása sikeresnek bizonyult, hamarosan több kutatócsoport is beszámolt FM/NM multiréteges nanohuzalok nanopórusos membránokban történő előállításáról és igen nagy, többször tíz százalékos GMR-effektust tapasztaltak [13–15]. Ezzel párhuzamosan természetesen FM-fémek és ötvözeteik felhasználásával erőteljes kutatás indult meg homogén mágneses nanohuzalokon is [16], nyilván a szóba jöhető mágneses információátviteli lehetőségek miatt, de szupravezető [17] és félvezető [18] tulajdonságú nanohuzalokat is előállítottak már.

A továbbiakban csak fémes nanohuzalok előállítását fogjuk tárgyalni, beleértve a sablonok készítését is. A nanohuzalok mágneses és magnetotranszport sajátosságainak ismertetésére egy következő dolgozatban fogunk sort keríteni. A nanoszerkezetek mágneses tulajdonságaival kapcsolatban addig is felhívjuk az érdeklődő olvasók figyelmét *Szunyogh László* nemrég megjelent magyar nyelvű írására a nanomágnességről [19].

A „nanosablon” kifejezést olyan eszközök összefoglaló nevéként használjuk, amelyekkel közvetlenül az elektród felületénél tudjuk szabályozni (behatárolni) a leváló anyag laterális kiterjedését a nanométeres tartományban. Ennek következtében a minta nem tömbi anyagként fog leválni, hanem csak a nanosablon által biztosított rendelkezésre álló teret tölti be.

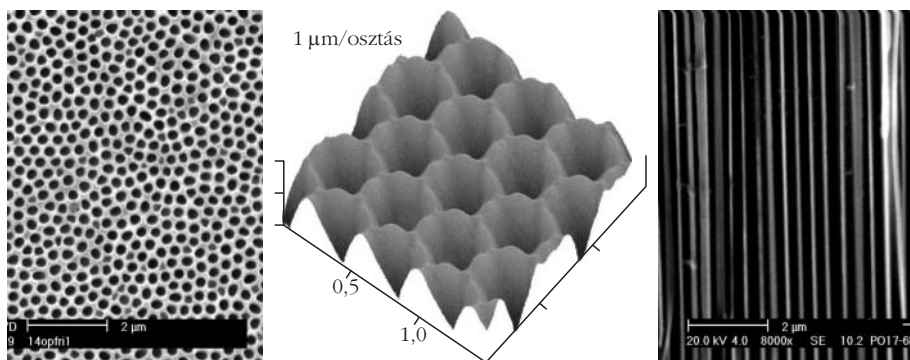
Általában kétféle típusú membránt használnak nanohuzalok előállítására: polimer alapú (többnyire polikarbonát) membránokat [13, 14] és elektrokémiai maratással előállított alumínium-oxid membránokat [9, 10, 20, 21].

A polikarbonát membránokat egy tömbi polimerfóliából állítják elő a felületre merőlegesen alkalmazott ionizáló sugárzás segítségével [22]. Az ionizáló sugárzás részecskéi (a sugárzás típusától és energiájától függő mértékben) roncsolják a polikarbonátot, felszakítják a kémiai kötéseket. Ezek a tartományok szelektív kémiai marással eltávolíthatók, ami után egy csőszerű üregeket (nanopórusokat) tartalmazó membrán jön létre. A pórusűrűség a sugárzás dóziséval szabályozható, de ezáltal egy laterálisan rendezetlen nanopórusrendszert kapunk. A sugárdózis extrém csökkentésével elérhető, hogy gyakorlatilag egyedi nanohuzalokat állítsunk elő és vizsgáljunk anélkül, hogy azokat a membránból eltávolítanánk [23].

A legrendezettebb membránok az anódos maratással készült alumíniumoxid (AAO) sablonok. Ezzel a módszerrel  $10^3$ – $10^4$  hosszúság/átmérő arányú pórusokat tartalmazó,  $10^{11}$  cm<sup>-2</sup> pórusűrűségű nanosablonok hozhatók létre.

A nanohuzalokkal foglalkozó kutatócsoportok többnyire a kereskedelmi forgalomban kapható polikarbonát-alapú (például [24]) vagy AAO (például [25, 26]) membránokat használják, amelyekben a pórusátmérő néhány tíz vagy száz nanométer nagyságrendű. A kereskedelmi membránok esetében azonban mind a lehetséges pórusátmérő, azaz huzalátmérő, mind a pórus-hossz, azaz az előállított nanohuzal hossza erősen behatárolt. Ezen geometriai korlátokon túl a kereskedelmi membránokkal általában az is gond, hogy – mivel ezek szűrési célokra készülő tömegtermékek – a bennünk levő nanopórusok méreteinek egyenletessége és alakjának szabályossága, valamint a nanopórusok membránbeli szabályszerű elrendeződése nem feltétlenül teljesítik azokat a követelményeket, amelyekre az egyenletes nanohuzal-előállításra szükség lenne. Ezért egyre többen választják a membránok „házi” elkészítését.

A rendezett szerkezetű nanopórusos alumínium-oxid membránok többlépéses eljárással alakíthatók ki. Az alumíniumlemezt elektropolírozás után savban (foszfor-, oxál- vagy kénsavban) nagy feszültséggel (20–195 V) anódosan marva az alumíniumlemez belseje felé haladva az Al fém egyre mélyebben átalakul alumínium-oxiddá. Ez azonban nem egy összefüggő Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> réteget jelent, hanem (a marás feszültségével arányos átmérőjű) pórusok, csatornák alakulnak ki az oxidban. Ezek eleinte véletlenszerűen rendeződnek el, de növe-



oxid felső tartománya még rendezetlen. Elegendően hosszú maratás után azonban a pórusok végül az önszerveződés révén hatszöges szerkezetbe rendeződnek a folyamatosan egyre mélyebbre hatoló alumínium-AAO határfelületen.

Ha szelektíven lemarjuk a keletkezett alumínium-oxidot az alumínium felületéről, a marás után egy olyan tiszta alumíniumfelületünk marad vissza, amelyen hatszöges rendszerben levő póruskezdemények találhatóak, ezek képezik a má-

1. ábra. AAO membrán mikroszkópos képei. Balra: pórusos alumíniumoxidról készült pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvétel (felülnézet). Középen: a pórusrendszer tetejének atomierő-mikroszkópos képe. Jobbra: Az alumíniumoxid-membrán keresztmetszeti SEM-képe. Előállítási körülmények: háromszori marás 1 mólos foszforsavban 195 voltban. Az első két marás által eredményezett oxidréteget 0,2 mólos krómsavval távolították el. (Gong és Zangari nyomán [27].)

kedésük során (azaz a kiinduló alumíniumlemez belseje felé haladva) úgy változik folyamatosan az egymáshoz képesti helyzetük, hogy egy bizonyos mélységben már egyenlő távolságra lesznek egymástól (ezt nevezik *önszerveződésnek*). A növekedés elején összeolvadnak-szétváltnak egyes pórusok, ami miatt az alumínium-

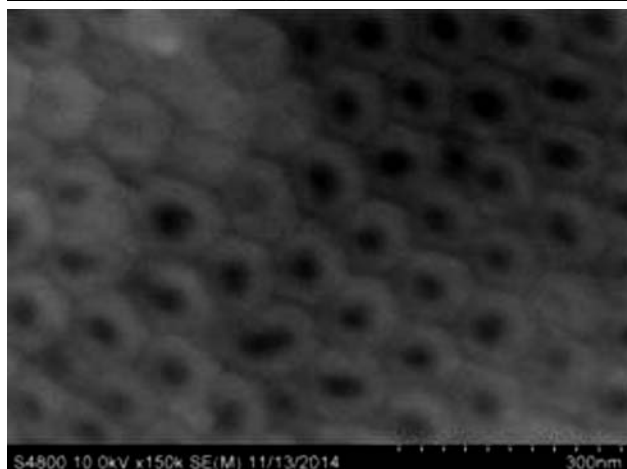
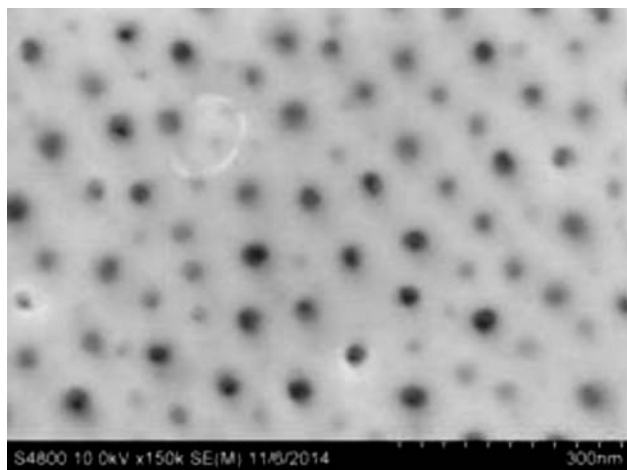
sodik marási folyamat kiindulópontjait. A kezdőpontok rendezettsége miatt ekkor már végig párhuzamos nanopórusok nőnek az  $Al_2O_3$ -ban (ha az első marással azonos körülményeket alkalmazunk). Bár az anodizáló feszültség nagyságával a keletkező pórusok átmérője az 50–500 nm-es tartományban szabályozható, a pórusátmérő/pórustávolság arány lényegében fix, ezért egymáshoz közelebbi, de nagyobb átmérőjű pórusokat csak utólagos kémiai marással lehet előállítani.

2. ábra. Egy saját laboratóriumunkban készült AAO membrán SEM-képei. Fent: a pórusos membrán felülnézeti képe. Lent: a pórusos membrán alulnézeti képe (a pórusok kinyitása nélkül). A képek a BAYATI miskolci laboratóriumában készültek, Menyhárt Adrienn és Dégi Júlia szíves közreműködésével.

Ezeket a rendezett csatornákat használhatjuk az előállítandó nanohuzalok geometriai korlátozására.

A második marás után a hátoldalról a maradék alumínium fém elmarva és az alumínium-oxid pórusok alján található alumínium-oxid záróréteget (az úgynevezett „barrier”) eltávolítva, egyenletesen rendezett pórusokat tartalmazó membránt kapunk. Ennek egyik oldalát jól vezető fémmelel (például arannyal) bevonva lehetségessé válik elektrolitoldatból fémmelel növesztetni a pórusokba. A módszer hátránya nyilvánvalóan a hosszú, többlépes előállítás. Az 1. ábra mutatja egy AAO membrán különböző nagytású mikroszkópos képeit egy szakirodalmi forrás [27] alapján.

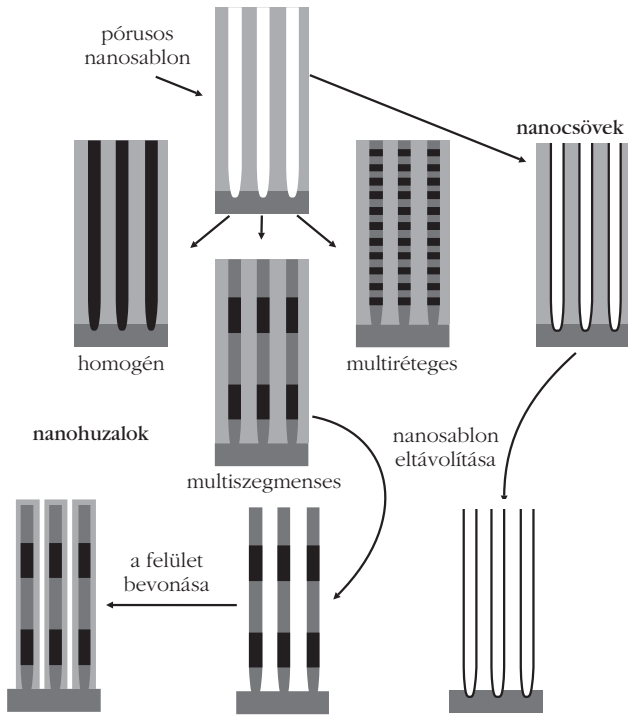
Saját laboratóriumunkban is megkezdttük az AAO nanosablonok készítését a kétlépes anodizálási eljárással. A 2. ábrán látható SEM-képek demonstrálják, hogy meglehetősen szabályos hatszöges elrendezésű pórusrendszert sikerült kapnunk az eddig kidolgozott membránkészítési eljárásunkkal.



## Elektrolizálás nanopórusos sablonokba

A nanosablonok nyitott oldalára elektrolitoldatot töltve az oldat rögtön belefolyik a pórusokba, egészen azok legaljáig. Így a membrán aljára felvitt fémbevonatot anódként használva különféle fémek választhatók le a nanopórusokba.

Legegyszerűbben homogén, azaz egyetlen fémből vagy ötvözetből álló nanohuzalok növeszthetők. Azonban ha a növesztést túl gyorsan, azaz túl nagy feszültséggel akarjuk kivitelezni, a növekedés a pórusfal felgyorsulhat a pórus közepéhez képest és így nem nanohuzalt, hanem nanocsövet kapunk. Az alacsony



3. ábra. Nanopórusokban elektrokémiai módszerrel előállítható különféle nanostruktúrák. (Péter és Bakonyi nyomán [30]).

áramkihasználási hatásfok és a pórusok közepén fejlődő hidrogénbuborékok miatt megváltozó oldatáramlási kép még inkább elősegíti a csőszerű növekedést [28].

Egy nemrégiben megjelent és szabadon hozzáférhető összefoglalóban [29] részletes áttekintés található az eddig előállított fémes és nemfémes homogén nanohuzalokról és nanocsövekről.

Az elektrolitikusan leválasztott multiréteges filmekhez hasonló módszerrel [12], több fém sóját tartalmazó oldatot használva és impulzusos leválasztást alkalmazva, a huzalok hossz tengelye mentén szakaszosan váltakozó összetételű szerkezet is kialakítható elektrokémiai úton. Ha a szegmensek hossza a nanohuzal hossz tengelye mentén jóval nagyobb, mint a nanohuzal átmérője, akkor multiszegmenses nanohuzalnak nevezzük a létrejött struktúrát, ha viszont a szegmensek vastagsága jóval kisebb a nanohuzal átmérőjénél, akkor multiréteges nanohuzalnak.

Itt impulzusos leválasztáson azt értjük, hogy az elektrolízis során állandó áramú vagy állandó potenciálú impulzusokat váltakozva alkalmazunk, az áram vagy a potenciál értékét úgy megválasztva, hogy a kívánt összetételű és vastagságú szegmenst/réteget kapjuk. Egy adott impulzus alatt a leváló anyag összetétele szabályozható az oldat összetétele mellett az alkalmazott áram erősségével is, az adott ideig tartó impulzus alatt levált anyag mennyisége (így vastagsága) pedig a Faraday-törvényből határozható meg. Ez az eljárás megegyezik a nanosablon alkalmazása nélkül előállított multirétegfilmek leválasztásával [12].

A nanosablon eltávolítása (feloldása) után újabb elektrolízálással a nanohuzalokat be lehet még vonni, így akár mágneses bevonatú nemmágneses huzal vagy nemmágneses bevonatú mágneses huzal is készíthető.

A nanopórusos sablonokba elektrokémiai módszerrel leválasztható különféle nanostruktúrák vázlatos képét a 3. ábra mutatja be.

Végezetül rá kell mutatnunk arra, hogy fontos elvi különbség van a multiréteges filmek és a multiréteges nanohuzalok elektrokémiai előállítási körülményeiben. Míg a multiréteges filmeket gyakorlatilag végtelen kiterjedésű (makroszkopikus) sík felületre választjuk le, addig a nanohuzalok leválasztása igen korlátozott geometriában történik, nevezetesen a nanoméretű átmérővel rendelkező hosszú pórusokba, amelyek felületi sűrűsége igen nagy (tipikusan  $10^{11}$  pórus/cm<sup>2</sup>). Ebből az következik, hogy az elektrokémiai leválasztási körülményeket nem lehet közvetlenül átvinni a síkfilmekről a nanohuzalos geometriára. Viszonylag kevés közlemény [31–33] foglalkozott eddig a korlátos geometriába történő elektrolízálás problematikájával, így ezen a területen további kutatásokra lesz még szükség a nanopórusok egyenletes feltöltését biztosító elektrokémiai leválasztási feltételek kidolgozására, amihez tervezett munkánkkal mi is hozzá kívánunk járulni.

## Irodalom

1. T. Böhnert, A. C. Niemann, A.-K. Michel, S. Bäbster, J. Gooth, B. G. Tóth, K. Neuróhr, L. Péter, I. Bakonyi, V. Vega, V. M. Prida, K. Nielsch, *Phys. Rev. B* 90 (2014) 165416.
2. Bakonyi I., Simon E., Péter L., *Fizikai Szemle* 58 (2008) 41.
3. www.zyvex.com/nanotech/feynman.html
4. Tanczikó F., Major M., Nagy D. L., *Fizikai Szemle* 57 (2007) 78.
5. H. Gleiter, *Progr. Mater. Sci.* 33 (1989) 223.
6. Beke D., H. Bakker, *Fizikai Szemle* 43 (1993) 307.
7. A. E. Berkowitz, et al., *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 3745; Q. Xiao, J. S. Jiang, C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* 68 (1992) 3749.
8. C. A. Foss Jr, G. L. Hornyak, J. A. Stockert, C. R. Martin, *J. Phys. Chem.* 96 (1992) 7497.
9. C. R. Martin, *Science* 266 (1994) 1961.
10. H. Masuda, K. Fukuda, *Science* 268 (1995) 1466.
11. M. Alper, et al., *Appl. Phys. Lett.* 63 (1993) 2144.
12. I. Bakonyi, L. Péter, *Progr. Mater. Sci.* 55 (2010) 107.
13. A. Blondel, et al., *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 3019.
14. L. Piraux, et al., *Appl. Phys. Lett.* 65 (1994) 2484.
15. K. Liu, et al., *Phys. Rev. B* 51 (1995) 7381.
16. L. Sun, et al., *IBM J. Res. Dev.* 49 (2005) 79.
17. L. Piraux, S. Mátéfi-Tempfli, M. Mátéfi-Tempfli, et al., *J. Nanosci. Nanotechnol.* 5 (2005) 376.
18. L. Menon, et al., *J. Nanosci. Nanotechnol.* 12 (2012) 7658.
19. Szunyogh L.: *Nanomágnesség. Magyar Tudomány* 175 (2014) 286.
20. A. P. Li, et al., *Advanced Materials* 11 (1999) 483.
21. Y. Lei, W. P. Cai, G. Wilde, *Progr. Mater. Sci.* 52 (2007) 465.
22. P. Apel, *Radiat. Meas.* 34 (2001) 559.
23. M. Daub, et al., *J. Optoe. Adv. Mater.* 7 (2005) 865.
24. www.gelifesciences.com/webapp/wcs/stores/servlet/CategoryDisplay?categoryId=11251&catalogId=10101&productId=&top=Y&storeId=12751&langId=-1
25. www.gelifesciences.com/webapp/wcs/stores/servlet/catalog/en/GELifeSciences-HU/service-and-support/whatman-filter-selector/
26. www.synkerainc.com/ceramic-membranes-a-filters-pricing
27. J. Gong, G. Zangari, magánközlemény.
28. D. M. Davis, E. J. Podlaha, *Electrochem. Solid-State Lett.* 8 (2005) D1.
29. W. J. Stepniowski, M. Salerno, Ch. 12 in e-Book *Manufacturing Nanostructures*. Eds. W. Ahmed, N. Ali (One Central Press, Manchester, 2014); www.onecentralpress.com/manufacturing-nanostructures
30. L. Péter, I. Bakonyi, Chapter 5, in: *Nanomagnetism and Spintronics: Fabrication, Materials, Characterization and Applications*. Eds.: F. Nasirpour, A. Nogaret (World Scientific, Singapore, 2011), p. 98.
31. D. Pullini, et al., *J. Magn. Magn. Mater.* 316 (2007) e242.
32. F. S. Fedorov, et al., *J. Electrochem. Soc.* 160 (2013) D13.
33. S. Blanco, R. Vargas, J. Mostany, C. Borrás, B. R. Scharifker, *J. Electrochem. Soc.* 161 (2014) E3341.

# FELHŐZÖTTSEGMÉRÉS, OPTIKAI FELHŐFELISMERŐ ALGORITMUSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA – 1. RÉSZ

Horváth Gábor, Egri Ádám, Blahó Miklós

Környezetoptika Laboratórium, Biológiai Fizika Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem

Barta András, Barta Pál

Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Horváth Ákos

Rutherford Appleton Laboratory, Remote Sensing Group, Oxford

Karl Bumke

GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel

Andreas Macke

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

A meteorológiai megfigyelések egyik legfontosabb eleme az égbolt felhőborítottságának becslése, ami felhasználható többek között a tengerfelszín besugárzása és a légkör napenergia-átvitele jellemzésénél, a naperőművek számára készülő rövidtávú napsugárzás-előrejelzésekben vagy a hosszútávú éghajlatmodellekben. A felhőzöttségbecslést hagyományosan meteorológus észlelők végezték/végzik a földfelszínről. E személyhez kötött módszer azonban csak kevés mérőállomáson kivitelezhető, továbbá drága, szubjektív és csak kis felbontású felhőméréseket jelent, mert az égbolt nyolcadaiban szolgáltat felhőfedettségi adatokat. A digitális fényképezőgépek megjelenése és gyors terjedése lehetővé tette az olcsó, folyamatos működésű, automatikus felhőkamerák kifejlesztését, amelyek az égboltfény szín- és intenzitáseloszlása alapján objektív és számszerű információkat adnak a felhőborítottságról.

Ma már számos fotometrikus égboltkamera érhető el a piacon, mint például a (i) *Total Sky Imager* (Yankee Environmental Systems, Turner Falls, MA, USA), (ii) *Whole Sky Imager* (Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, CA, USA) és (iii) *All Sky Imager* (Atmospheric Physics Group, University of Granada, Spanyolország), ám ezek csak nempolarimetrikus (szín, fényintenzitás) információkat használnak a felhőzöttség meghatározásához. A legújabb vizsgálatok szerint a felhőzöttség becslését segítik a 180° látószögű képalkotó polarimetriával mért égboltpolarizációs mintázatok [1].

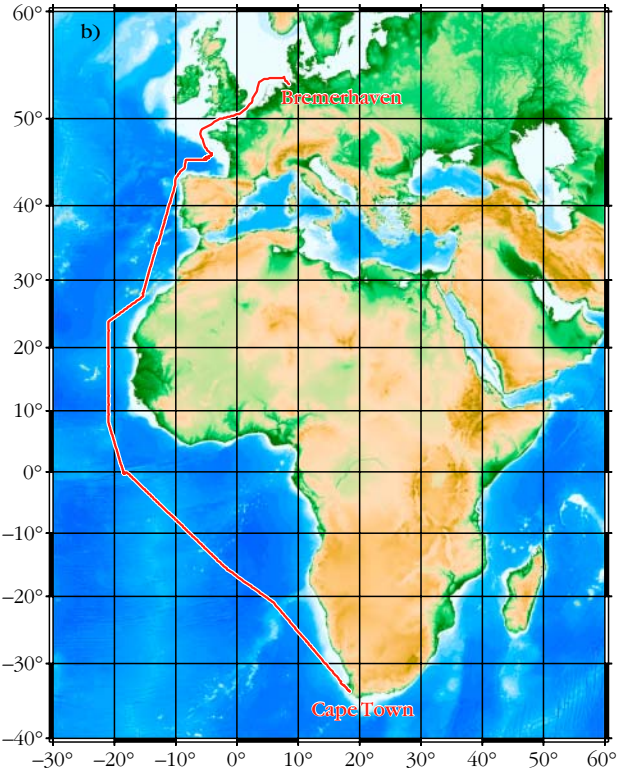
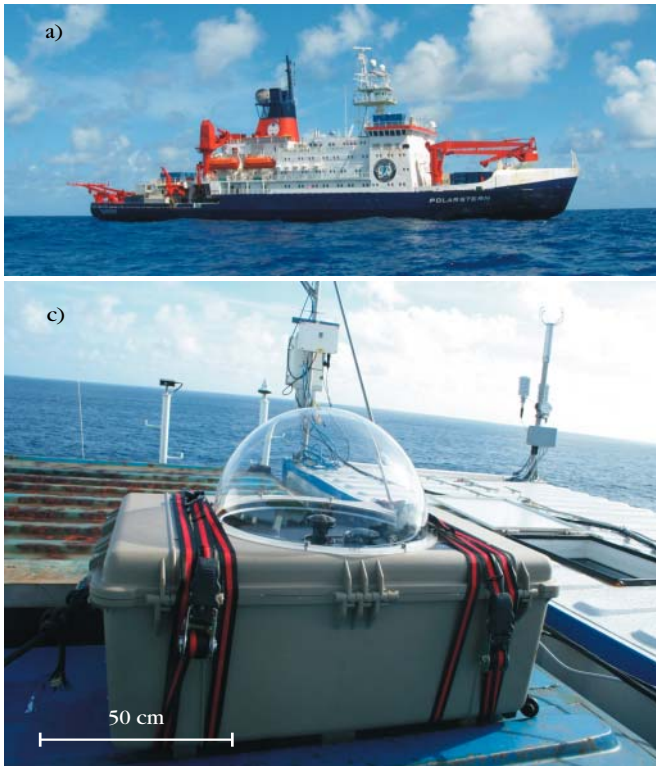
A földfelszíni polarimetrikus égboltfény-mérések alapján tudjuk, hogy az égboltfény polarizációs iránymintázata a meteorológiai viszonyoktól függetlenül nagyon stabil, minőségileg gyakorlatilag azonos [1, 2].

A tiszta, részben felhős, teljesen felhős, ködös, füstös és lombos alatti égboltok polarizációs mintázataiban az egyetlen lényegi különbség a  $p$  lineáris polarizációfokban van: minél nagyobb a nemtisza légkör optikai vastagsága, annál kisebb az égboltfény  $p$ -értéke. Az égboltfény  $\alpha$  polarizációs szög-mintázatának robusztusságát a fény egyszeres szóródásának dominanciája okozza, ami többszörös szóródás fellépése esetén, azaz felhők és köd jelenlétében is megmarad. Az  $\alpha$ -mintázat tehát állandó, a  $p$ -mintázat ugyanakkor érzékeny a fényszóró részecskék típusára és méretére, és ez alkalmas lehet a felhődetektálás pontosságának javítására. A tiszta és felhős ég polarizációjának elméletét és mérését, továbbá a fényelnyelés, valamint a Rayleigh-, felhő- és aeroszórás által módosult mintázatait [1–3] foglalja össze.

A fénypolarizációban rejlő többletinformációkat a POLDER (*Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances*) és PARASOL (*Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar*) műholdas műszerek használták fel elsőként a felhők tulajdonságainak meghatározásában [4, 5]. A műholdas polarizációs méréseket a vízfelhők és jégfelhők elkülönítésére [4], illetve a felhőket alkotó részecskék effektív sugarának meghatározására [6] használják rutinszerűen. A földi polarizációs méréseket főként a légköri aeroszolok méreteloszlásának és típusának meghatározásában alkalmazzák [7], a felhőtulajdonságok mérésében pedig csak manapság kezdik használni.

2010 őszén egy saját fejlesztésű képalkotó polarizációs felhődetektort teszteltünk a német Polarstern kutatóhajón az Atlanti-óceánt átszelő ANT-XXVII/1 expedíció [8]. Jelen cikkünkben bemutatjuk e műszert és az expedíció végzett mérések eredményeit. A felhődetektorunkkal mért adatok kiértékelését felhőazonosításra szolgáló 13 algoritmussal végeztük, köztük olyan újakkal is, amelyek polarizációs információkat is használnak. Ily módon a polarizációs és nempolarizációs algoritmusok pontosságát hasonlítottuk össze. A kutatóhajó által bejárt útvonalból adódóan számos klímaöv felhőzöttségét vizsgáltuk, miáltal a különböző felhődetektációs algoritmusokat változatos felhőzöttségi viszonyok között tudtuk összeha-

Köszönjük a német Alfred Wegener Intézetnek a Polarstern kutatóhajó ANT-XXVII/1 expedícióján való részvételünk lehetőségét. Kutatómunkánkat az OTKA K-105054 (*Égbolt-polarimetria a felhők felismerésére és a polarimetrikus viking-navigációknak kedvező meteorológiai viszonyok vizsgálatára*) pályázat támogatta. Horváth Gábor köszöni a német Alexander von Humboldt Alapítvány műszeradományát és egy három hónapos kutatási ösztöndíját (3.3-UNG/1073032 STP, 2013 június 1. – augusztus 31., Regensburgi Egyetem). Köszönjük Farkas Alexandra doktorandusz segítségét az angol cikkünk magyarra fordításában.



1. ábra. a) A Polarstern kutatóhajó az ANT-XXVII/1 Atlanti-óceáni expedíción (fénykép: Karl Bumke). b) Az expedíció útvonala Bremerhaventől Fokvárosig Gran Canarián át, 2010. október 25. és november 26. között. c) A hajó fedélzetén telepített polarizációs felhődetektorunk.

sonlítani. Az Atlanti-óceánon való utazás rendkívüli körülményei között alkalmunk volt felhődetektorunk terepi ellenállóképességének ellenőrzésére is.

## Mérési és számítási módszerek

### ANT-XXVII/1 expedíció

A Polarstern kutatóhajó (1.a ábra) ANT-XXVII/1 expedíciója az Atlanti-óceánon haladt keresztül a németországi Bremerhaventől a Kanári-szigetekhez tartozó Gran Canarián át a dél-afrikai Fokvárosig 2010. október 25. és november 26. között (1.b ábra). Az expedíció Biscayai-öbölben töltött első hete rendkívül viharos volt, így a felhődetektort nem tudtuk telepíteni a fedélzeten. Csak a viharzóna elhagyása után, 2010. november 2-től végeztünk 15 napon át folyamatos felhőméréseket.

### 180° látószögű képalkotó polarimetrián alapuló felhődetektor

Polarizációs felhődetektorunk egy szabadalmaztatott, hordozható, egykamerás, forgóanalizátoros képalkotó polariméter, ami egy digitális ipari kamerából, 180° látószögű halszemoptikából, lineáris polárszűrőket tartalmazó forgatható szűrőtárcsából, napkitakaró tárcsából, vezérlőegységből és időjárásálló műszerdobozból áll. Az 1.c és 2. ábra a felhődetektort és szerkezetét mutatja. A kamera (Imaging Source DFK 41BU02) felbontása 1280×960 pixel egy 1/2" formátumú CCD érzékelőlapkán (Sony ICX205AK), amelyen

egy Bayer-szűrő tette lehetővé a színes, valamint az infravörös méréseket. A teljes égboltot egy Fujinon FE185C046HA-1 180° látószögű halszemoptika képezte le a CCD egy kör alakú területére. A CCD középpontja és a halszemobjektív optikai tengelye nem esett egybe, ezért az égbolt egy kis része a mérési tartományunkon kívülre került (az égbolt ezen információmentes részeit a polarizációs mintázatokon külön jelöljük). A három különböző áteresztési irányú lineáris polárszűrővel készített 180° látószögű égbolt-

2. ábra. A polarizációs felhődetektorunk belső szerkezete. A halszemoptika és a kamera közti forgatható szűrőtárcsa öt szűrőt tartalmazott (1. táblázat). A napkitakaró egymástól függetlenül irányítható azimut- és elevációkarja lehetővé teszi, hogy a napkitakaró tárcsát a műanyag kupolán belül tetszőleges pozícióba helyezhessük, így mindig teljes árnyékban tartva a halszemoptikát.

kép alapján a polarizációs információk meghatározásának módját már részletesen leírtuk [9].

Az optikai elemek belső felületein zavaró fényviszszaverődések léptek volna föl közvetlen napfényben, ami mérési hibákhoz (becsillanások okozta műtermékekhez) vezetett volna, amelyeket egy mozgatható napkitakaró akadályozott meg. A napkitakaró mechanizmus egy ívelt kar végére szerelt fekete korongot mozgatott két (azimut, eleváció) tengely körül a halszemoptika fölött egy szervomotorral, miáltal a lencse a mérések során végig árnyékban maradt. A halszemobjektív Mueller-mátrixát a [9]-ben közölt módon határoztuk meg, a lencse reflexiójának a polarizációs állapotra gyakorolt hatását pedig elhanyagolhatónak találtuk.

A CCD-szenzor és a halszemobjektív között egy szűrőtárcsa helyezkedett el, amit egy másik szervomotor forgatott, így téve lehetővé a benne elhelyezkedő öt különböző szűrő gyors pozícionálását. E szűrők tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze. A látható tartományban infravörös szűrőt, a közeli infravörös mérésekhez pedig látható szűrőt használtunk. Bár műszerünk alkalmas volt közeli infravörös mérések végzésére is, ezen infraadatokat e cikkünkben nem használjuk.

A mérések időzítéséért, a napkitakaró mozgatásáért, a szűrőtárcsa forgatásáért, a kamera exponálásáért és a fényképek tárolásáért a vezérlőegység és a beépített számítógép felelt. A számítógépet hagyományos TCP/IP kapcsolaton keresztül tudtuk elérni konfiguráció, karbantartás és a mért fényképek letöltése céljából. A teljes rendszert egy robusztus időjárásálló doboz (Peli 1650) védte a környezeti hatásoktól. A doboz záró fedelét egy 42 cm átmérőjű átlátszó műanyag félgömbre cseréltük, hogy a napkitakaró szabad mozgását lehetővé tegyük. A doboz és a műanyag félgömb találkozását leszigeteltük, a műszer belső terének hőmérsékletét egy Peltier-elemes hűtő, valamint egy kis teljesítményű fűtőszál segítségével szabályoztuk, a páratartalmat pedig 1 kg szilikagéllal tartottuk alacsony szinten.

Polariméterünk ideális szárazföldi körülmények között alkalmas az égboltnapfény polarizációfokát  $\pm 1\%$  és polarizációs szögét  $\pm 1^\circ$  pontossággal mérni. Az Atlanti-óceánon ugyanakkor – felhődetektorunk pontossága a mérések szekvenciális volta és a mozgó platform miatt – kisebb volt ( $\pm 1-3\%$ ,  $\pm 1-3^\circ$ ). Előzetes méréseink szerint a műanyag védőfedélre rakódott por, esőcseppek és a tengervízből származó sókristályok is befolyásolták a kapott égboltpolarizációs adatokat, ezek azonban elkerülhetetlenül jelen voltak az expedíció során. A kiváló optikai minőségű műanyag félgömb polarizációra gyakorolt hatását nem vettük figyelembe, mivel annak mértéke nagyságrendekkel kisebbnek bizonyult az előbbi hatásoknál.

## Tanítás és teszt

A Polarstern-expedíció során készített nagyszámú mérésekből egy előszűrés során a kiértékeléshez ötven különböző égboltot választottunk ki, amelyek jól repre-

<b>Felhődetektorunk szűrőtárcsájában használt öt szűrő</b>	
sorszám	szűrő
1.	látható: a spektrum infravörös tartományát szűrte ki
2.	infravörös: a spektrum látható tartományát szűrte ki
3.	látható polárszűrő: az infravörös-tartományt szűrte ki, és a látható tartományban lineáris polárszűrőként működött a szűrőtárcsa sugarától $0^\circ$ -os áteresztési iránnyal
4.	látható polárszűrő: mint a 3., de $45^\circ$ -os áteresztési iránnyal
5.	látható polárszűrő: mint a 3., de $90^\circ$ -os áteresztési iránnyal

Kalibrációhoz a spektrum látható tartományát áteresztő szűrőt használtunk. Az infravörös szűrő kifejezetten kísérleti jellegű volt.

zentálták a különféle lehetséges meteorológiai helyzeteket. Létrehoztunk egy maszkot, amely kitakarta a hajó felépítményeit a kiválasztott összes mérésből. Mind az ötven égbolton a felhőket egymástól függetlenül három ember ismerte föl szabad szemmel. Kézi retusálással egy maszkkal jelölték ki a felhőket a látható tartománybeli szín és intenzitás alapján, vagyis az infravörös és polarizációs információk nélkül. A végső konszenzusos felhőmaszkot, amit a továbbiakban referenciának tekintettünk, e három egyedi felhőmaszkból hoztuk létre: minden olyan képpontot felhősnek tekintettünk, amit legalább két fő felhősnek ismert fel.

Az 50 mérést véletlenszerűen két 25 mérésből álló csoportra osztottuk, amelyek egyikét tanításra, másikat tesztre használtuk. A tanítókészlet méréseinek felhasználásával optimalizáltuk az alábbiakban ismertetett 13 felhődetekciós algoritmus szabad paramétereit, az algoritmusok hibáinak meghatározásához pedig a tesztkészlet méréseit használtuk. Egy adott algoritmus hibájának jellemzésére először meghatároztuk a tesztkészlet méréseinek a háttérmaszkon kívül eső képpontjainak  $N_i$  számát, valamint az algoritmus által a konszenzusos felhőmaszkokhoz képest hibásan felismert képpontok  $N_e$  számát. Egy adott algoritmus  $E$  hibáját az  $E = N_e/N_i$  hányadossal definiáltuk. A statisztikai megbízhatóság növelése érdekében a számításokat az 50 égboltból véletlenszerűen kiválasztott 10 különböző 25 tanító / 25 teszt égbolttal végeztük el.

## Felhődetekciós algoritmusok

Több felhődetekciós algoritmust fejlesztettünk ki, amelyek némelyike kizárólag fotometrikus (színes képi) információkat használ, míg mások fotometrikus és polarimetrikus adatokat egyaránt. A saját, újonnan fejlesztett algoritmusainkon kívül kipróbáltunk olyanokat is, mint például a jól ismert RBR (*Red-Blue Ratio*) módszer [10]. Összesen 13 algoritmust teszteltünk, amelyek közül némelyiknek több változatát is kipróbáltuk.

Vörös-kék különbség (*Red-Blue Difference* – RBD)

A vörös-kék különbség (RBD) algoritmus a vörös ( $I_R$ ) és kék ( $I_B$ ) intenzitást használja, és akkor tekint egy képpontot tiszta égboltnak, ha e két intenzitás különbségére igaz, hogy

$$I_R - I_B < c_{rbd},$$

ahol  $c_{rbd}$  egy küszöbérték. Tiszta kék égbolt esetén a különbség negatív értéket vesz fel, míg a fehér/szürke/pirosas felhők jelenlétében a különbség nullához közeleli.

Fehérségdetektor (*Whiteness Detector* – WD)

A WD-algoritmus a szürke/fehér képpontokat tekint felhősnek, a többi rész pedig a tiszta égboltot jelenti. Egy képpont fehér/szürke, ha

$$1 - \frac{I_R}{I_B} < c_w \quad \text{és} \quad 1 - \frac{I_G}{I_B} < c_w,$$

ahol  $I_R$ ,  $I_G$  és  $I_B$  a vörös, zöld és kék intenzitások, míg  $c_w$  egy optimalizálandó paraméter. Tapasztalataink szerint  $I_R < I_B$  és  $I_G < I_B$  mindig igaz volt a teljes égbolton, ezért

$$1 - \frac{I_R}{I_B} \quad \text{és} \quad 1 - \frac{I_G}{I_B}$$

mindig pozitív értékeket vett föl.

Vörös-kék arány (*Red-Blue Ratio* – RBR)

A vörös-kék különbséghez hasonlóan, az RBR-algoritmus a vörös ( $I_R$ ) és kék ( $I_B$ ) intenzitásokat használja. E módszer akkor tekint tisztának egy adott képpontot, ha

$$\frac{I_R}{I_B} < c_{rbr},$$

ahol  $c_{rbr}$  egy optimalizálandó paraméter. A tiszta égbolt tipikusan kék, ezért az  $I_R/I_B$  arány kicsi, míg a felhők fehérek/szürkék, így azok jelenlétében ez az arány nagyobb.

$k$  legközelebbi szomszéd (*k-Nearest Neighbors* –  $k$ NN)

A fenti egy vagy két szabad paraméterrel rendelkező algoritmusok közös gyengesége, hogy csak korlátozott optimalizálást tesznek lehetővé. Ennek kiküszöbölésére a  $k$ NN-algoritmust használtuk, ami felügyelt tanításra is alkalmas. A tanítás során készítettünk egy  $256 \times 256 \times 256$ -os tömböt, amelynek minden elemét 0 kezdőértékkel töltöttük fel. A tanító-készlet minden egyes képpontját megfeleltettük a tömb egy-egy elemének az  $I_R$ ,  $I_G$  és  $I_B$  intenzitásérték alapján, és az elem számlálóját eggyel növeltük, ha az adott képpont felhős volt, illetve eggyel csökkentettük, ha az a tiszta égbolthoz tartozott. Végül a tesztkészlet minden egyes képpontját megfeleltettük

a tömb egy-egy elemének, és kiválasztottuk az elem  $k$  legközelebbi szomszédját, amelynek értéke nem 0 volt. A tömbben a távolságokat a háromdimenziós euklideszi geometria alapján számoltuk. A képpontot felhősnek tekintettük, ha a  $k$  szomszédos elem közül több pozitív volt, mint negatív, egyébként pedig tiszta égboltnak vettük. Lényegében e módszerrel azt határoztuk meg, hogy egy adott RGB-színű képpont mekkora valószínűséggel tartozik inkább felhőhöz, mint tiszta égbolthoz.

Fehérségdetektor átlagos intenzitással (*Whiteness Detector with Average Intensity* – WDAI)

Az általunk kifejlesztett WDAI-algoritmus a WD fehérségdetektor egy változata, ahol a  $c_i(I)$  küszöbérték nem állandó, hanem a vizsgált képpont környezetének mediánszűrt intenzitásától függ.

Először mindhárom – R, G, B – spektrális tartományban meghatároztuk a mediánszűrt intenzitást egy  $135 \times 135$  képpont méretű ablakkal, amelynek  $40,5^\circ$ -os átmérőjét optimalizálással kaptuk.

Ezután meghatároztuk a mediánszűrt spektrális átlagintenzitást:

$$I = \frac{I_R + I_G + I_B}{3}.$$

Végül ennek segítségével kiszámítottuk a

$$c_i(I) = a_i I + b_i,$$

küszöbértéket, ahol  $a_i$  és  $b_i$  optimalizálandó paraméterek.

A WDAI-algoritmus esetén mind a teljes intenzitást, mind a polarizálatlan intenzitást kipróbáltuk, ahol az utóbbi kismértékben alacsonyabb hibát adott. Egy adott képpont polarizálatlan intenzitása

$$I_{up} = I(1 - p),$$

ahol  $I$  a képpont intenzitása,  $p$  pedig annak polarizációfoka.

Fehérségdetektor naptávolsággal (*Whiteness Detector with Solar Distance* – WDSD)

A szintén általunk fejlesztett WDSD-algoritmus ugyancsak a WD fehérségdetektor egy változata, ahol a  $c_d(d)$  paraméter a vizsgált képpont és a Nap középpontja közötti  $d$  euklideszi távolság függvénye. A küszöbértéket a

$$c_d(d) = a_d d + b_d$$

összefüggés határozza meg, ahol  $a_d$  és  $b_d$  optimalizálandó paraméterek. Mivel a Nap közelében az égbolt fényesebb, a naptávolságtól függő küszöbérték bevezetésével a WD-algoritmus javítható. Kipróbáltuk ugyanezt az algoritmust szögtávolsággal és Manhattan-távolsággal is, de az egyszerű euklideszi távolság használata adta a legjobb eredményt.



## Hibrid küszöb algoritmus (*Hybrid Thresholding Algorithm* – HTA)

A hibrid küszöb algoritmus (HTA) az

$$\frac{I_B/I_R - 1}{I_B/I_R + 1}$$

arányt használja, és az osztályozást rögzített vagy minimum kereszt-entrópiaküszöbvel végzi el. A szóban forgó arány hisztogramjának uni- vagy bimodalitása dönti el, hogy melyik küszöbértéket kell használni. Az uni- vagy bimodalitást a hisztogram szórása különbözteti meg. Egy felhőket és tiszta égboltot is tartalmazó kép  $(I_B/I_R - 1)/(I_B/I_R + 1)$  arányhisztogramja általában bimodális nagy szórással, míg egy tiszta égboltot vagy teljesen felhős égboltot tartalmazó kép hisztogramja unimodális kisebb szórással. Így az algoritmus a hisztogram szórása alapján választ a rögzített és a minimum kereszt-entrópiaküszöb használata között.

A HTA-algoritmust [11] alapján valósítottuk meg. Ugyanakkor, míg [11]-ben a horizontközeli és a Napközeli területeket kimaszkolták, addig mi minden égbolterületet felhasználtunk. A rögzített küszöbnek a

$$c_{FIX} = \frac{1/c_{rbr} - 1}{1/c_{rbr} + 1}$$

értéket használtuk, ahol  $c_{rbr}$  az RBR-algoritmus optimális küszöbértéke. Az optimalizálandó paraméter a  $c_{SD}$  szórási küszöbérték volt, amelynek értéke különíti el a használandó küszöb módszert. Ha az  $(I_B/I_R - 1)/(I_B/I_R + 1)$  arányhisztogram szórása kisebb, mint  $c_{SD}$ , a rögzített küszöbértéket használtuk, máskülönben a minimum kereszt-entrópiaküszöböt.

## Zöld polarizációfok-különbség (*Degree of Polarization Difference in the Green Spectral Range* – pDG)

A pDG-algoritmus az égbolt képpontjait felhősnek tekinti, ha azokra fennáll, hogy

$$p_m - p_B < c_{pDG},$$

ahol  $p_m$  a mért lineáris polarizációfok a zöld spektrális tartományban,  $p_B$  a [12]-ben leírt égboltmodell alapján számolt polarizációfok a mérésel azonos napállás esetén,  $c_{pDG}$  pedig egy optimalizálandó paraméter. Ellenkező esetben a képpontot tisztának tekinti.

## Zöld polarizációfok-arány (*Degree of Polarization Ratio in the Green Spectral Range* – pRG)

A pRG algoritmus az égbolt képpontjait felhősnek tekinti, ha

$$\frac{p_m}{p_B} < c_{pRG},$$

ahol  $p_m$  és  $p_B$  ugyanazt jelentik, mint a pDG esetén, míg  $c_{pRG}$  egy optimalizálandó paraméter. Máskülönben a képpontot tisztának tekinti.

## Neurális hálózat (*Neural Network* – NN)

Rengeteg információt hordoznak a polarizációs mérések, amelyek figyelembe vehetők egy optimális felhődetekciós algoritmussal, amelynek hibája a lehető legkisebb. Vannak helyi optikai információk, mint például a vörös tartományban mért intenzitás vagy a kék tartományban mért polarizációfok. Ezekon kívül vannak globális optikai információk is, mint például a zöld tartományban mért átlagos intenzitás vagy a kék tartománybeli polarizációfok varianciája a teljes égboltra nézve. Vannak nem optikai jellegű információk is, mint például a Nap horizont fölötti szögmagassága vagy a vizsgált képpont és a Nap közötti azimutuszög. Ezen információk némelyike egyszerűen figyelembe vehető, míg mások algoritmusba való beemelése kihívást jelent. A nehézséget annak meghatározása jelenti, hogy egy emberi megfigyelő miként dönti el az égbolt egy adott pontjáról, hogy felhős vagy tiszta. Elképzelhető, hogy adott tulajdonságú fényt egyes esetekben felhőnek, máskor pedig tiszta égboltnak tartunk.

E problémák némelyikének orvoslására többretegű perceptron alapú neurális hálózatot szoktak használni, ami alkalmas felügyelt tanulásra, de a bemeneti paramétereket csak helyi optikai és nempolarimetrikus információkra korlátozza. A cél a sebesség és a pontosság közti egyensúly megtalálása. A mi neurális hálózatunk

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

szigmoid aktivációs függvényvel bír. Elkerülendő annak lehetőségét, hogy potenciálisan hasznos információt hagyunk ki a bemeneti paraméterek közül, amit a neurális hálózat fel tudott volna használni, úgy döntöttünk, hogy olyan sok bemeneti paramétert használunk, amennyit csak tudunk. Nem tartozott céljaink közé, hogy végül meghatározzuk, mely paramétereket használta fel ténylegesen az algoritmus.

Neurális hálózataink szerkezetét az egyes rétegekben található neuronok számával jellemezhetjük. Ha például egy hálózatot az  $i-j-k-1$  számsorral jellemezzük, akkor  $e$  hálózatnak  $i$  bemeneti neuronja van,  $j$  neuronja van az első belső rétegben,  $k$  neuronja a második belső rétegben és  $1$  neuronja a kimeneti rétegben. A bemeneti réteg és valamennyi belső réteg tartalmazott plusz egy neuront, ami nem csatlakozott egyetlen neuronhoz sem az előző rétegből, és amelynek mindig  $1$  volt a kimenete. A kimeneti rétegnek egyetlen neuronja volt, amelynek célértéke tiszta égbolt esetén  $0$  volt, felhő esetén pedig  $1$ . A kiértékelés során a vizsgált képpontot tisztának tekintettük, ha a kimeneti neuron értéke  $< 0,5$ , egyébként pedig felhősnek. Tanító algoritmusunk az úgynevezett *back-propagation* algoritmus volt  $0,001$ -es tanulási rátával, hogy elkerüljük a súlyok oszcillációját. Minden neuronréteg teljes egészében kapcsolódott az előzőhöz. A bemeneti paramétereket a *2. táblázat* foglalja össze. Az  $I$  intenzitás és a  $p$  lineáris polarizációfok átlagát és varian-

ciáját az adott képpont körüli 3×3-as ablakban számoltuk. Az egyszerű intenzitás neurális hálózatot (*simple intensity neural network* – SINN) és az egyszerű polarizációfok neurális hálózatot (*simple degree of polarization neural network* – SpNN) a 7–3–1 rétegszerkezet jellemezte. A nem-polarimetrikus neurális hálózat (*non-polarimetric neural network* – NNN) rétegszerkezete 15–16–16–16–1 volt, míg a polarimetrikus neurális hálózaté (*polarimetric neural network* – PNN) 27–28–14–1.

A kísérleti eredmények bemutatására, elemzésére és a belőlük levonható következtetések ismertetésére a következő lapszámban kerül sor.

#### Irodalom

- Horváth G. (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences* (2nd ed.) Springer Series in Vision Research, vol. 2 (series editors: S. P. Collin, J. N. Marshall) Springer: Heidelberg, Berlin, New York, 2014.
- Horváth G., Varjú D.: *Polarized Light in Animal Vision – Polarization Patterns in Nature*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York, 2004.
- Coulson K. L.: *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 1988.
- Deschamps P. Y., Bréon F. M., Leroy M., Podaire A., Bricaud A., Buriez J. C., Seze G.: The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32 (1994) 598–615.
- Fougnie B., Bracco G., Lafrance B., Ruffel C., Hagolle O., Tinel C.: PARASOL in-flight calibration and performance. *Appl. Opt.* 46 (2007) 5435–5451.
- Bréon F. M., Doutriaux-Boucher M.: A comparison of cloud droplet radii measured from space. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43 (2005) 1796–1805.
- Cairns B., Carlson B. E., Laci A. A., Russell E. E.: An analysis of ground-based polarimetric sky radiation measurements. *Proc. SPIE* 3121 (1997) 382–393.
- Barta A., Horváth G., Horváth Á., Egri Á., Blahó M., Barta P., Bumke K., Macke A.: Testing a polarimetric cloud imager aboard research vessel Polarstern: Comparison of color-based and polarimetric cloud detection algorithms. *Appl. Opt.* 54 (2015) 1065–1077 + címkép
- Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B., Wehner R.: Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle. *Proc. Roy. Soc. A* 457 (2001) 1385–1399.

2. táblázat

**A négy neurális hálózat (NN) alapú felhődetekciós algoritmus bemeneti paramétere**

bemeneti paraméter	neurális hálózat			
	PNN	NNN	SINN	SpNN
az egész képre átlagolt $I$ a vörös (650 nm) tartományban	×	×		
az egész képre átlagolt $I$ a zöld (550 nm) tartományban	×	×		
az egész képre átlagolt $I$ a kék (450 nm) tartományban	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a vörösben	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a zöldben	×	×		
$I$ egész képre számított varianciája a kékben	×	×		
az egész képre átlagolt $p$ a vörösben	×			
az egész képre átlagolt $p$ a zöldben	×			
az egész képre átlagolt $p$ a kékben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a vörösben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a zöldben	×			
$p$ egész képre számított varianciája a kékben	×			
a Nap horizont fölötti elevációs szöge	×	×	×	×
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a vörösben	×	×	×	
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a zöldben	×	×	×	
átlagos $I$ a vizsgált képpontra a kékben	×	×	×	
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a vörösben	×	×		
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a zöldben	×	×		
$I$ varianciája a vizsgált képpontra a kékben	×	×		
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a vörösben	×			×
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a zöldben	×			×
átlagos $p$ a vizsgált képpontra a kékben	×			×
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a vörösben	×			
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a zöldben	×			
$p$ varianciája a vizsgált képpontra a kékben	×			
a vizsgált képpont horizont fölötti elevációs szöge	×	×	×	×
a vizsgált képpont és a Nap azimuttszög-távolsága	×	×	×	×

$I$ : intenzitás,  $p$ : lineáris polarizációfok. Az egyes paraméterek használatát a PNN, NNN, SINN és SpNN algoritmusokban × jelzi. Egy vizsgált képpont esetén az  $I$  és  $p$  átlagát és varianciáját az adott képpont körüli 3×3-as ablakban számoltuk.

- Ohmura A., Dutton E. G., Forgan B., Fröhlich C., Gilgen H., Hegner H., Heimo A., König-Langlo G., McArthur B., Müller G., Philipona R., Pinker R., Whitlock C. H., Dehne K., Wild M.: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): new precision radiometry for climate research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 (1998) 2115–2136.
- Li Q., Lu W., Yang J.: A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 28 (2011) 1286–1296.
- Berry M. V., Dennis M. R., Lee R. L. Jr.: Polarization singularities in the clear sky. *New J. Phys.* 6 (2004) 162.



Az utóbbi két évtizedben több mint kétezer exobolygót – a Naprendszerből távoli csillagok körül létrejött bolygót – találtak. Az exobolygók gyakorisága arra enged következtetni, hogy a Tejútrendszerben akár több (100 milliárd) bolygó keletkezhetett, mint csillag. Az eddig felfedezett exobolygórendszerek lényegesen eltérnek Naprendszerünkétől, és bolygók megdöbbentő változatosságát mutatnak. Ismerünk Föld-szerű és a Földnél nagyobb kőzetbolygókat, a Neptunusznál kisebb vagy akár a Jupiternél tízszer nagyobb óriásbolygókat, amelyek csillaguk közvetlen közelében, vagy tőlük óriási távolságban keringenek.

A modern csillagászat egyik legfontosabb kérdése, hogy miként alakultak ki ezen bolygórendszerek, és miért fejlődtek a mi Naprendszerünkétől eltérő szerkezetűvé. A távoli bolygórendszerek keletkezésének jobb megértése által az emberiséget régóta foglalkoztató kérdésekre kaphatunk választ, például arra, hogyan jött létre számunkra oly értékes planétánk, a Föld, illetve vannak-e a Földhöz hasonló bolygók a Tejútrendszerben.

## Módszerek távoli bolygók felfedezésére

### Képalkotás

A legegyszerűbb módszer, amelynek segítségével megpillanthatnánk egy távoli csillag körül keringő bolygót, a képalkotás. Azonban ez némi nehézségbe ütközik, ha kiszámítjuk, hogy milyen fényesnek látnánk a csillaga fényét visszaverő bolygót az optikai hullámhossztartományban (0,3–0,7  $\mu\text{m}$ ). Egy  $R_p$  sugarú és  $A$  albedójú (fényvisszaverő képesség, a Földé  $\sim 0,3$ ) bolygó,  $a$  távolságban (csillagászati egységben, 1 CSE = a Nap–Föld-középtávolság) a csillagától a rávetülő fénynek csupán

$$f = 0,00014 \frac{A}{0,3} \left( \frac{R_p}{R_\odot} \right)^2 \frac{1}{a^2}$$

részét veri vissza. Egy Föld-szerű bolygó így 24–25 magnitúdóval lenne halványabb a csillagnál. Ez az óriási fényességkontraszt lehetetlenné teszi a bolygó által visszavert fény közvetlen detektálását.

Nagyobb szerencsével járunk, ha a bolygó infravörös hullámsávbeli ( $> 0,7 \mu\text{m}$ ) sugárzását próbálnánk detektálni. Feltételezve, hogy a bolygó felszíni hőmérséklete hasonló a Földéhez ( $T_p \sim 270 \text{ K}$ ), akkor feketetest-sugárzásának maximuma nagyjából a 20  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszra esne. Ekkor egy  $R_*$  sugarú csillag esetén a kontrasztarány

$$f = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \frac{\exp(bv/k_B T_*)}{\exp(bv/k_B T_p)}$$

lenne, ami az előző esethez képest 4–5 magnitúdóval nagyobb kontrasztarányt jelentene. Igen ám, de ahhoz, hogy az infravörös-tartományban meg tudjunk különböztetni egy Föld-szerű bolygót és a tőle 1 CSE-re levő csillagát, elképesztően nagy, közel 50 m átmérőjű távcsőre lenne szükségünk, hiszen a távcsövek felbontóképessége a hullámhosszal fordítottan arányos.

A bolygók képalkotással történő felfedezését az is nehezíti, hogy ha a fényképfelvétel egy halványan pislákoló fénypontot látunk a csillag mellett, az még nem jelenti azt, hogy kísérőjeként kering is körülötte. Ahhoz, hogy ezt bizonyítsuk, további felvételeket kell készítenünk, amelyeken egyértelműen kimérhető a kísérő elmozdulása, vagyis a csillag körüli keringése.

Így már érthető, hogy eddig csupán másfél tucat bolygóról – és azok is a Jupiternél nagyobb gázóriások – sikerült infravörös hullámhossztartományban képet alkotni, a legnagyobb (8–10 méteres) földi távcsövekkel, például a European Southern Observatory (ESO), Subaru, Gemini és a Keck Observatóriumok távcsöveivel, illetve a Large Binocular Telescope-pal (LBT), az világűrbeli pedig a Hubble Space Telescope (HST) segítségével. E felfedezések is csak úgy születhettek meg, hogy a napfizikában már korábban használt koronagráfához hasonló módszerrel, vagy egy teljesen új technikával, a nullázó interferométerrel elhalványították a bolygónál tízmilliárdszor fényesebb csillagot.

Bolygók termikus sugárzásának közvetlen detektálásával az első óriásbolygót, a 2M1207 vörös törpecsillag körül keringő gázóriást 2004-ben fedezték fel. A 2M1207b tömege majd tízszerese a Jupiterének, és olyan távol kering csillagától, mint a Plútó a Naptól. Négy évvel később már több exobolygórendszert sikerült észlelni. Ezek közül az egyik legnevezetesebb a HR 8799 rendszer, ahol rögtön három óriásbolygót, két évvel később pedig még egy újabbat is felfedeztek. Azóta képalkotással még további féltucat gázóriást sikerült felfedezni. Az így felfedezett legkisebb óriásbolygó, a Fomalhaut csillag körül keringő is kétszer nagyobb, mint a Jupiter. Ám a Fomalhaut bolygójával kapcsolatosan felmerült az a kétely, hogy infravörös sugárzása túl halvány egy óriásbolygóéhoz képest, inkább egy neutroncsillagéhoz hasonlít.

### Radiális sebesség mérése

Már a 20. század első felében felvetették, hogy egy csillag hozzánk viszonyított, úgynevezett radiális sebességének periodikus változásai alapján ki lehetne mutatni egy nagy tömegű kísérő, azaz egy óriásbolygó jelenlétét.

Egy távoli csillag körül keringő óriásbolygó hatására a csillag hol hozzánk közeledni, hol tőlünk távolodni látszik a két égitest közös tömegközéppont körüli ke-

ringése miatt. Ezért a csillag által kisugárzott fény periodikus Doppler-eltolódást szenved. Az impulzusmegmaradás egyenletéből levezethető, hogy az  $M_*$  tömegű csillag radiális sebességének látóirányú komponense

$$v_* \sin(i) = \frac{M_p}{M_*} \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \sin(i)$$

amplitúdóval szinuszosan oszcillál egy  $a$  távolságban, a látóiránnyal  $i$  szöget bezáró síkban körpályán keringő,  $M_p$  tömegű bolygó hatására. Az oszcilláció periódusa megegyezik a bolygó keringési idejével:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_*}}$$

Ennek kimérésével a bolygó tömege meghatározható – valójában csak a lehetséges legkisebb tömeg, azaz  $M_p \sin(i)$ , mivel a pályasík látóiránnyal bezárt szöge ismeretlen.

A bolygók nemcsak kör alakú, hanem elliptikus pályán is keringhetnek csillaguk körül. Ekkor  $e_p$  excentricitású bolygópálya esetén a csillag radiális sebességének amplitúdóváltozása kissé módosul:

$$v_* \sin(i) = \frac{1}{\sqrt{1 - e_p^2}} \frac{M_p}{M_*} \sqrt{\frac{GM_*}{a}} \sin(i)$$

Így a radiális sebesség időbeli változása nem tisztán szinuszos jellegű, és a radiális sebesség amplitúdójának maximuma jóval nagyobb lehet, mint körpálya esetén. Ez utóbbi könnyen megérthető annak fényében, hogy az elliptikus pályán a pericentrumban (a bolygó és a csillag egymáshoz legközelebbi helyzetében) a mozgás felgyorsul. Mivel a bolygópálya excentricitását nem ismerjük, a bolygótömeg több különböző  $e_p$  feltételezéssel kiszámított és a mért radiálissebesség-változások összehasonlításával becsülhető.

Egy csillag bolygója által okozott radiálissebesség-változás amplitúdója igen kicsi, a Nap–Jupiter esetén 12 m/s, míg a Nap–Föld esetén 1 m/s. Ezért az exobolygók közvetett detektálása csak úgy lehetséges, ha a csillag spektrumában egyszerre több elnyelési vonalat vizsgálunk. Az ilyen módszerrel elsőként talált exobolygó a *Michel Mayor* és *Didier Queloz* által felfedezett, mindössze 4,2 nap periódusidővel keringő, fél Jupiter-tömegű 51 Pegasi b óriásbolygó.

Történeti érdekességként említjük meg, hogy az első, kétséget kizáró exobolygó-felfedezés *Aleksandr Wolszcan* és *Dale Frail* nevéhez köthető, akik 1992-ben meglepő módon nem egy közönséges csillag, hanem egy pulzár körül fedeztek fel egyszerre két bolygót. A PSR 1257+12 jelű milliszekundumos pulzár anomális pulzusváltozásairól kimutatták, hogy azt a fentebb bemutatott jelenség, azaz a pulzárnak a bolygói hatására létrejövő reflexmozgása okozza. Az azóta pontosított mérések alapján ma azt gondoljuk, hogy e pulzár két, egy, a Földnél nagyobb tömegű ( $4 M_\oplus$ ) és egy, a Földnél kisebb tömegű ( $0,02 M_\oplus$ ) bolygónak ad otthont.

## Asztrometria

Magától értetődő, hogy az előbb bemutatott jelenség alapján úgy is kimutathatjuk a szemünk elől elrejtőző bolygót, ha annak gravitációs hatását a csillag elmozdulásából mérjük ki. Így – az előzőekben bemutatott módszerektől eltérően – a bolygópálya excentricitása és a pálya hajlásszöge is meghatározható lenne.

Az astrometriai módszert gyakran alkalmazzák kettőscsillagok pályaszámítására, de ezzel a módszerrel eddig még nem sikerült bolygószerű kísérőt kimutatni. Ennek oka az, hogy egy 10 fényév távolságú csillag látszó elmozdulása közelítőleg 10 μív másodperc, ha  $10 M_\oplus$  tömegű bolygója 1 CSE távolságban kering körülötte. Ez az elmozdulás még mindig kisebb, mint a jelenleg legprecízebb astrometriai műszer, az Európai Űrügynökség (ESA) Gaia űrszondájának pontossága, ami egy 15 magnitúdós csillag esetén 10 milliív másodperc.

## Bolygóátvonulás a csillagkorong előtt

Ha egy bolygó keringése során periodikusan elvonulni látszik csillagának korongja előtt, akkor a csillag fényességében periodikus fényességcsökkenést figyelhetünk meg. Fontos, hogy az elhalványodás amplitúdója független a bolygó keringési távolságától, szemben az előző fejezetben tárgyalt effektussal. Mivel az elhalványodás amplitúdója csupán a bolygó és a csillag méretétől függ,

$$f = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2,$$

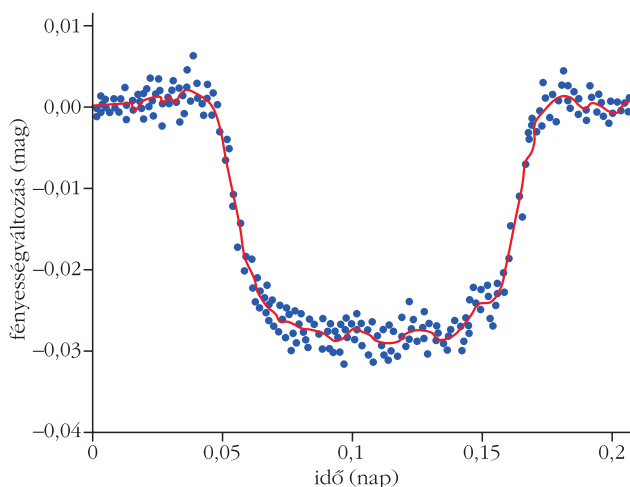
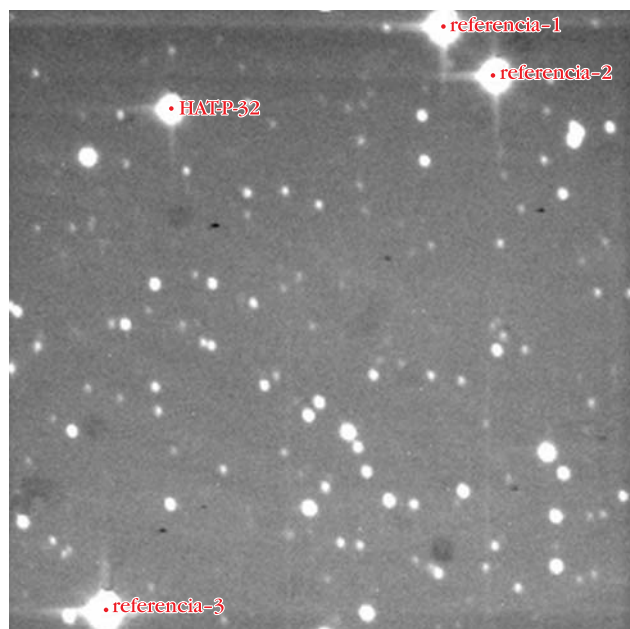
ezért a bolygóátvonulások segítségével meghatározható a bolygó sugara. Egy Jupiter-szerű gázóriás esetén a fényességcsökkenés 0,01 magnitúdó lenne, azonban egy, a Föld átlagos sűrűségével megegyező kőzetbolygó esetén csupán

$$8,4 \cdot 10^{-4} \left( \frac{M_p}{M_\oplus} \right)^{2/3} \text{ magnitúdó.}$$

A keringés során előfordulhat az is, hogy a csillag takarja el a bolygót, ekkor is csökken a csillag-bolygó rendszer fényessége, mégpedig pontosan a bolygó saját fényével. Ez az úgynevezett mellékminimum igen kicsi periodikus fényességcsökkenést eredményez, egy 1000 K felszíni hőmérsékletű óriásbolygó esetén csupán 10 milliimod magnitúdónyit. A csillag fényesség-változását okozhatja az is, hogy a bolygó keringése során – a Hold fázisaihoz teljesen hasonló módon – változó nagyságú felületet látunk a csillag által megvilágítva. Emiatt a rendszer fényessége folyamatosan nő a főminimumtól, majd újra csökken a mellékminimumig.

Óriásbolygók fedésének kimérése tehát nem könnyű, de kivitelezhető, elegendően precíz fotometriai módszerek segítségével, közepes vagy kis átmérőjű földi távcsövekkel is. A relatív fotometriai módszernél a látómezőben feltűnő, állandó fényességű csillagok





1. ábra. HAT-P 32 jelű óriásbolygó fedése. Felül a fotometriához használt állandó fényű csillagok (referencia-1, -2, -3), alul a HAT-P 32 csillag fényességcsökkenése látható. A mérést a szerző az MTA CSFK Csillagászati Intézet Piszkéstetői Observatóriumának 50 cm-es távcsövével, ANDOR iXON 888 EMCCD kamerával készítette. Forrás: <http://www.konkoly.hu/staff/regaly/research/HAR.html>

átlagos fényességét hasonlítjuk a vizsgálni kívánt csillag változó fényességéhez, így a folyamatosan jelen levő légköri zaj lényegesen csökkenthető (1. ábra).

Egy Föld méretű kőzetbolygó által okozott fényességcsökkenés kimérésekor a földi légkör zavaró effektusait nem tudjuk a szükséges mértékben kiküszöbölni, ezért a világűrbe telepített távcsőre van szükségünk. A NASA Kepler űrtávcsövének segítségével mára már több mint ezer exobolygót ismerhettünk meg, és még további négyezer bolygójelölt akad a négy évet felölelő adatsorokban. Egyelőre azért csak bolygójelöltek, mert hasonló periodikus fényességcsökkenést más jelenség, például a csillag korongján elvonuló, a napfoltokhoz hasonló csillagfolt is okozhat. Így az exobolygójelölteket radiálissebesség-méréssel is ellenőrizni kell, hogy valóban bolygó okozza-e a csillag fényének periodikus elhalványodását.

Amint a bolygó belép a csillag korongja elé, vagy kilép onnan, a csillag fényessége lineárisan csökken vagy növekszik, míg a plátón még további gyenge halványodás, majd fényesedés látható (1. ábra). Az első effektus annak a következménye, hogy a bolygó belépéskor egyre nagyobb területet takar ki a csillagkorongból és egyre kisebbet kilépéskor. A második effektus azért lép fel, mert a csillagkorong a középpontja felé egyre fényesebb, így a bolygó egyre fényesebb területet takar ki a csillagból a csillagkorong középpontjához közeledve és egyre halványabbat, amint távolodik onnan. A plató alakjának kimérésével így lehetőség nyílik a bolygópálya és a csillagkorong relatív helyzetének megállapítására is.

Nem minden bolygót látunk elvonulni a csillag korongja előtt, hiszen a bolygópálya síkja tetszőleges lehet. Statisztikai számítások szerint, ha minden csillag körül keringene egy Föld típusú bolygó, akkor minden pillanatban százezerből egy csillag tranzitját észlelhettünk. Ezért a Kepler űrtávcső és más, földi bolygókereső projektek (például Wide Angle Search for Planets [WASP] vagy Hungarian Automated Telescopes [HAT]) egyszerre több százezer csillagot vizsgálva periodikusan visszatérő fényességváltozásokat keresnek. A bolygóátvonulás módszerén alapuló projektek máig 656 exobolygórendszert, összesen 1179 exobolygót fedeztek fel. A fenti számokat összevetve láthatjuk, hogy az exobolygórendszerek majd felében több bolygó is kering.

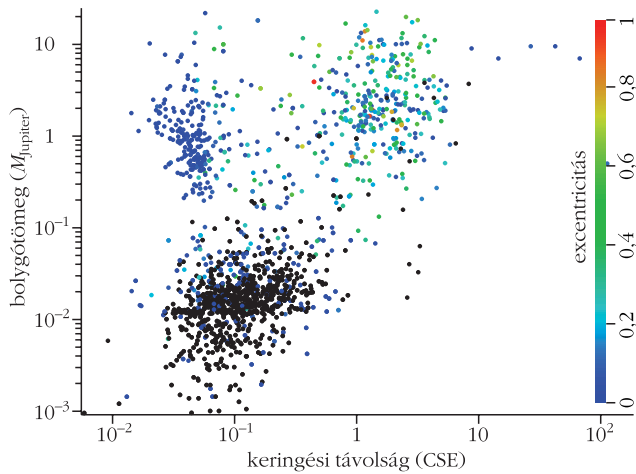
A bolygófedés módszerét a radiálissebesség-mérésekkel ötvözve a bolygók belső szerkezetét (sűrűségét) is megállapíthatjuk, ugyanis a fedésből a bolygó sugara, míg a radiálissebesség-mérésekkel tömege állapítható meg.

## Gravitációs lencsézés

Az általános relativitáselmélet szerint a fény sugar elterül egy gravitáló test környezetében, hasonlóan ahhoz, ahogy a megváltozott törésmutatójú közegben a fény törést szenved. Egy tőlünk  $d_L$  távolságban levő  $M_*$  tömegű test a mögötte levő, tőlünk  $d_s$  távolságban elhelyezkedő csillag pontszerű képét egy Einstein-gyűrűbe képezi le, amelynek térbeli látszó átmérője

$$\Theta_E = \frac{2}{c} \sqrt{GM_* \frac{d_s - d_L}{d_L d_s}}$$

A Tejútrendszer 25 000 fényévre levő középpontja felé rengeteg csillagot láthatunk, ezért jó esélye van annak, hogy a Tejútrendszer középpontjában, illetve a hozzánk képest félúton levő csillagok időnként pontosan azonos irányban látszanak. Amikor a hozzánk közelebbi csillag éppen áthalad a távoli csillag előtt, a gyűrűben megnövekszik a fényintenzitás, ugyanis a  $\Theta_E = 0,001$  olyan kicsi szög, hogy magát a gyűrűt felbontani nem tudjuk. Ha a lencsecsillag körül egy nagy tömegű bolygó  $\Theta_E$  szögnél kisebb távolságra látszik keringeni (10 000 fényévre levő csillagokra tipikusan néhány CSE-nek felel meg), a lassú fényességnöveke-



2. *ábra*. A 2015-ig felfedezett exobolygók tömege a keringési távolság függvényében. A színskála a bolygópályák excentricitását mutatja. Forrás: <http://exoplanets.org>

dés mellett egy hirtelen kifényesedést is észlelhetünk, amikor a bolygó és a lencsecsillag éppen egy irányban látszanak.

Tehát ahhoz, hogy a Tejútrendszer közepe felé felúton keringő csillagok körüli bolygókat felfedezzük, csupán annyi a dolgunk, hogy folyamatosan mérjük a Tejútrendszer középpontjához közeli csillagok fényességváltozását. A lassú, jellemzően néhány hetes, közel 5 magnitúdós kifényesedésekben hasonló nagyságú, de gyors (a bolygótömegtől függően 1 nap Jupiter-szerű, illetve néhány óra Föld-szerű bolygók esetében) kifényesedéseket keressünk. Részletes statisztikai vizsgálatok szerint a Tejútrendszer közepontja körül levő nagyszámú (közelítőleg 100 millió) csillag miatt évente legfeljebb 500 gravitációs mikrolencsézési eseményt detektálhatunk. Az Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) vagy a Micro-

lensing Observations in Astrophysics (MOA) projekt keretében mára 32 bolygórendszert (két rendszerben egyszerre több bolygót is) fedeztek fel e módszerrel.

## Távoli bolygórendszerek tulajdonságai

A következőkben bemutatjuk, hogy a fentebb tárgyalt módszerekkel az elmúlt húsz évben felfedezett majd kétezer exobolygó (2. *ábra*) statisztikai analízise alapján Naprendszerünk mennyire hasonló a távoli bolygórendszerekhez, vagy eltérő azoktól. Előbb azonban tekintsük át, hogy milyen alapvető tulajdonságai vannak Naprendszerünknek: nyolc bolygó kering benne; a kisméretű kőzetbolygók  $0,4\text{--}1 R_{\oplus}$ , a nagyméretű gázóriások pedig a  $3,9\text{--}11,2 R_{\oplus}$  sugarúak; a bolygók körpályán keringenek, az átlagos excentricitás kicsi:  $\langle e \rangle = 0,06$ ; a bolygók pályasíkja nagyjából megegyezik, az átlagos inklináció  $\langle i \rangle = 1,9^\circ$ -kal tér el a Naprendszer teljes peridülete által definiált síktól; a peridület nagy részét a bolygók hordozzák:  $L_{\odot}/L_p = 0,5\%$ ; a Nap egyenlítője  $6^\circ$ -kal tér el a Naprendszer síkjától.

## Bolygók magányos csillagok körül

Az ismert exobolygók tömegét keringési távolságuk ( $a$ ) függvényében ábrázolva (2. *ábra*) rögtön szembetűnik, hogy a Naprendszerben ismeretlen bolygócsaládok is léteznek, például a Jupiternél akár tízszer nagyobb tömegű óriásbolygók, illetve néhány napos keringési idejű (tehát a csillagukhoz nagyon közeli) pályákon keringő bolygók. A nagy tömegű bolygókat forró Jupitereknek, a Földnél nagyobb, kis tömegű bolygókat pedig forró szuper-Földeknek nevezzük.

A 2. *ábrát* szemlélve az is látható, hogy az exobolygók nem egyenletesen töltik ki az  $a\text{--}M_p$  síkot.

# LETÖLTHETŐ ÉS TÖBB MINT 3 MÉTER SZÉLESEN, SZÍNESEN KINYO A magyarázó szöveggel kiegészített posztert keressd a Fizikai Szemle ([www.fizikaiszemle.hu](http://www.fizikaiszemle.hu))

**Föld**

12 700 km

A Nap körül keringő Föld kőzetbolygó. A rajta kialakult oxigéntartalmú légkör, a felszínén összegyűlt víz és a Naptól való távolsága – körülbelül 150 millió km = 1 csillagászati egység (CSE) – együttesen kedvezett az élet kialakulásának.

**Naprendszer**

96 CSE

A Naprendszer központi csillaga, a Nap körül nyolc nagybolygó kering: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz. A Mars és a Jupiter pályája között található a Föld kisbolygók, de kisbolygók (aszteroidák) más pályákon is keringenek a Naprendszerben. A nagybolygók és a kisbolygók közötti mérettartományba ennek a törpebolygók, közülük öt ismert: Ceres, Eris, Haumea, Makemake és Pluto. A külső bolygók pályáján túl kezdődik a Kuiper-öv, amely apró égitesteket (közöttük üstökösöket) tartalmaz.

**A Naprendszer környezete**

~120 fényév

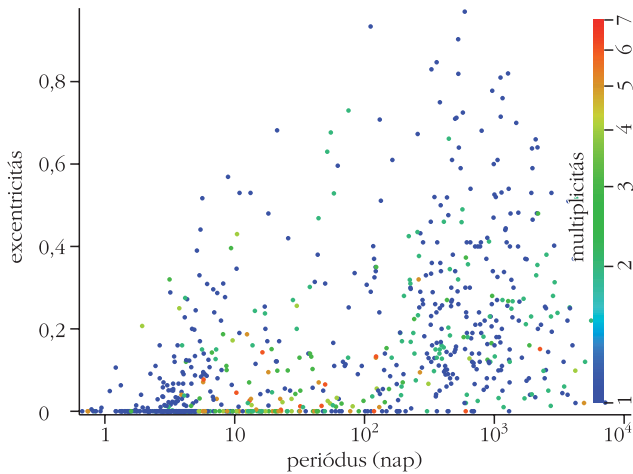
A Naprendszer nem ér véget a Kuiper-övnél, kifelé még az üstökösök tartalmazó Oort-felhő található, amelynek átmérője az 1 fényévet is meghaladja. A Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körülbelül 4,2 fényre van tőlünk. A csillagok nem egyforma erősen sugároznak, ezért egy csillag látszó fényességéből nem lehet következtetni a távolságára. A csillag fényteljesítménye (luminositása) a felszíni hőmérsékletétől és az átmérőjétől függ. Az égbolt fényességében nagyobb csillag, a Szíriusz 8,6 fényére van tőlünk, jó néhány csillag ennél közelebbi. A legfényesebb csillagokra egyedi tulajdonságokkal, a halványabbakra a csillagkatalógusokban kapott sorszámaikkal hivatkozunk.

**A Tejútrendszer**

~100 000 fényév

A szabad szemmel látható csillagok – a csak távcsővön át látható társaiikkal együtt – galaxisunk, a Tejútrendszer tagjai. A Tejút deringő sávja valójában halvány csillagok összemosódó fénye. A Tejútrendszer spirális galaxis: a csillagok zöme a csillagközi anyag nagy részével együtt spirálkarok mentén tömörül. Becslések szerint a Tejútrendszer 200 milliárd csillag alkotja.





3. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók excentricitása a keringési periódus függvényében. A színskála az adott rendszer bolygóinak számát jelöli. Forrás: <http://exoplanets.org>

Nagy keringési távolságokon kisebb tömegű bolygókat nem fedeztünk fel, de ez nem jelenti azt, hogy ilyenek nincsenek, csak azt, hogy a detektálási módszerek nem alkalmasak észlelésükre.<sup>1</sup>

Azt azonban valóban kijelenthetjük, hogy a néhány évnél rövidebb keringési idejű, 10–100  $M_{Jup}$  tömegű kísérőkből (vörös törpecsillagok) egy nagyságrenddel kevesebb van, mint az 1–10  $M_{Jup}$  tömegű óriásbolygókból. Ezt az érdekes tényt vöröstörpe-sivatagnak nevezzük. Jól látható, hogy 0,1  $M_{Jup}$  és annál nagyobb

<sup>1</sup> A Kepler űrszondával igen nehéz a több éves keringési idejű (a csillagtól távol keringő) és kis tömegű bolygók detektálása, mivel az általuk okozott fényességcsökkenés igen kicsi, illetve az űrszonda működési ideje alatt csak egy átvonulás figyelhető meg. A radiális sebesség mérése pedig azért érzéketlen a távol keringő bolygókra, mert a kísérő okozta tömegközéppont-eltolódás és így a csillag reflexmozgásának amplitúdója fordítottan arányos a bolygó keringési távolságával.

óriásbolygó jóval kevesebb van, mint kisebb tömegű bolygó. A kis tömegű bolygók általában kis excentricitású pályán keringenek, míg nagy excentricitás csak a csillagtól távolabbi pályákon tud kialakulni.

Részletes statisztikai vizsgálatok megmutatták, hogy a Nap típusú csillagok legalább 10%-ának van óriásbolygója, és 50%-ának ennél kisebb bolygója. A leggyakoribb bolygótömeg 5–10  $M_{\oplus}$ . Érdekes, hogy a forró Jupiterek általában magányosan fordulnak elő, míg a kisebb tömegű bolygóknak nagyobb valószínűséggel vannak kis tömegű bolygótársai.

A 3. ábra a bolygók excentricitását ábrázolja a keringési periódus függvényében. Szembeötlő, hogy a több bolygót is tartalmazó rendszerekben (ahol a multiplicitás nagyobb egynél) a bolygók jellemzően kis excentricitású pályákon keringenek, míg a csak egy bolygót tartalmazó rendszerekben nagyon elliptikus pályák is előfordulnak. Ez talán azzal magyarázható, hogy a nagy excentricitású pályák dinamikailag instabillá teszik a többes bolygórendszereket, így ezek kisebb számban fordulnak elő.

A 4. ábra a bolygók excentricitását mutatja a csillaguk fémtartalmának (a hidrogénnél nehezebb elemek és a hidrogén előfordulási arányának logaritmus,  $Fe/H = 0$  a Nap esetében,  $Fe/H < 0$  fémszegény,  $Fe/H > 0$  fémgazdag) függvényében. Látható, hogy a fémben gazdag csillagok bolygói nagyobb excentricitású pályákon keringenek, míg az alacsony fémtartalmú csillagok bolygói jellemzően kisebb excentricitású pályái vannak. További érdekesség, hogy a fémgazdag csillagok bolygói jellemzően távolabb keringenek csillaguktól. Ez azzal magyarázható, hogy a fémgazdag csillagok körüli protoplanetáris korongban (ahol a bolygók kialakultak) nagy mennyiségű szilárd anyag volt, így több bolygó keletkezhetett, amelyek végül a kölcsönös gravitációs perturbációik révén megnövelték pályáik excentricitását.

## MTATHATÓ A HELYÜNK A VILÁGEGYETEMEN MIND A NÉGY RÉSZEI!

Mellékletek menüpontjában, a posztot bátran rakjad ki a fizika-előadó vagy a folyosó falára!

### ÁGEGYETEMEN

**A galaxisok Lokális csoportja**

~10 millió fényév

**Virgo-szuperhalmasz**

~110 millió fényév

**Lokális szuperhalmaszok**

~1 milliárd fényév

**Az észlelhető Univerzum**

~90 milliárd fényév

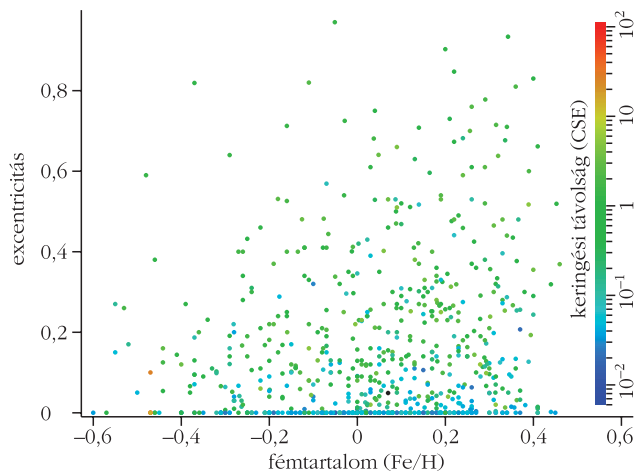
A galaxisok túlnyomó többsége nem elsősorban helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxissal együtt. E csoport meghatározó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

A galaxis-halmazok még nagyobb egységekre, úgynevezett szuperhalmaszokba szerveződnek. A Lokális csoport (benne a Naprendszer is tartozó Tejútrendszerrel) a Virgo-szuperhalmasz része.

A galaxisok halmazait tartalmazó szuperhalmaszok között hatalmas kiterjedésű űrtök vannak, amelyekben alig fordulnak elő galaxisok. A szuperhalmaszokat és az űrtöket egyaránt a csillagképről nevezték el, amelybe a geometriai középpontjuk esik.

Az Univerzum nagy skálájú szerkezete valójában szappanhabra emlékeztet: a buborékok felületén vannak a galaxisok és azok nagyobb szerveződési egységei, a galaxis-halmazok és szuperhalmaszok. A fény véges terjedési sebessége (körülbelül 300 000 km/s) miatt minél messzebbre nézünk, annál korábbi állapotokban vehetjük szemügyre az egységeket és azok rendszereit.

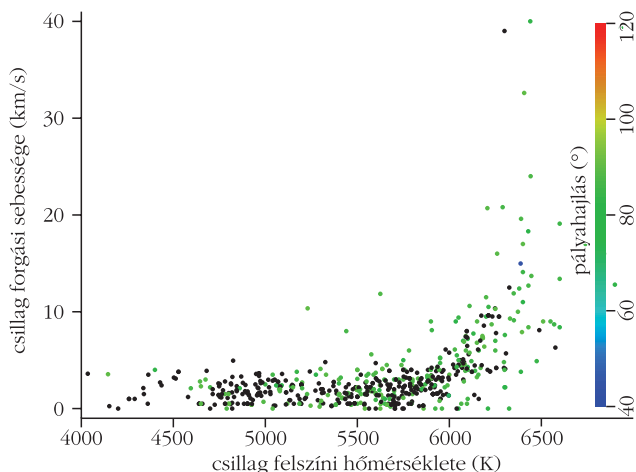
A Fizikai Szemle melléklete, 2014. április  
Kereskedelmi forgalomba nem hozható, elküldési címre szabadon felhasználható.  
Androv Z. Célján munkája alapján Szabolcs László és Kármán Tamás készítette.



4. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók excentricitása csillagok fémtartalmának (Fe/H) függvényében. A színskála a bolygók keringési távolságát jelöli. Forrás: <http://exoplanets.org>

Megvizsgálva a bolygók pályahajlását a csillagok egyenlítőjéhez képest, a következő érdekes tényre derül fény. Azt már régóta tudjuk, hogy a csillagok forgási sebessége és felszíni hőmérséklete kapcsolatban áll egymással: 6100 K felszíni hőmérséklet felett a csillagok egyre gyorsabban forognak (5. ábra). De az igazán érdekes az, hogy a hidegebb csillagok bolygóinak pályahajlása átlagosan kicsi, míg a forróbb csillagok bolygóinak pályasíkja lényegesen eltérhet a csillag egyenlítőjétől. Sőt ismerünk olyan bolygót is (WASP-17), amelyik a csillag forgásával ellentétes irányban kering, azaz a pálya hajlásszöge nagyobb  $90^\circ$ -nál. Ez azért furcsa, mert ha a bolygók a protoplanetáris korongból alakultak ki, akkor a csillagok és bolygók a korong kezdeti impulzusmomentumát örökölték meg. Így a bolygók pályahajlásának kicsinek kellene lennie, ugyanúgy, mint a Naprendszerben. A pályahajlási anomália talán azzal magyarázható, hogy a hideg csillagok belső szerkezete és mágneses tere eltér a forrókétól. A 6100 K-nél forróbb felszínű csillagokban nem, míg a

5. ábra. A 2015-ig felfedezett exobolygók csillagainak forgási sebessége ( $v_{\text{sin } i}$ ) a csillag felszíni hőmérsékletének ( $T_{\text{eff}}$ ) függvényében. A színskála a bolygó pályahajlását jelöli. A fekete pontokkal ábrázolt bolygóknál a pályahajlás nincs meghatározva. Forrás: <http://exoplanets.org>



hidegebbekben vastag konvektív zóna alakul ki, így ez utóbbiaknak jóval erősebb mágneses terük lesz. Ezért a hideg csillagok forgása a mágneses fékeződés következtében lelassul, miközben bolygók pályáját igyekeznek saját egyenlítői síkjukba fordítani. Forró csillagok körüli bolygók pályahajlása nagy maradhat, hiszen erős mágneses tér hiányában a fenti jelenség nem játszik szerepet. Az azonban továbbra is kérdés, hogy mi alakította ki a bolygók kezdeti nagy pályahajlását.

## Bolygók kettőscsillagok körül

Hogy tovább bővítsük a furcsaságok listáját, kettőscsillagok körül is találtak bolygókat, ahol a jelenlegi bolygókeletkezési elméletek szerint nem alakulhattak volna ki. Elméletileg a kísérőcsillag gravitációs perturbációja oly mértékben zavarja meg a protoplanetáris korong szerkezetét, hogy abban nem tud kialakulni bolygó (részletesebben cikkünk folytatásában tárgyaljuk). Mégis közel hetven olyan bolygó ismert, amelyek a kettős rendszernek csak az egyik komponense körül, és öt olyan, amely mind a két csillag körül kering (mint Luke Skywalker Tatooine-ja).

Elméleti vizsgálatok szerint a 20 CSE-nél tágabb szeparációjú kettőscsillagrendszerekben csupán 50%-kal kisebb az esélye annak, hogy a bolygó csak az egyik csillagot, és nem mindkettőt kerüli meg. Szoros kettős rendszerekben (a szeparáció  $< 20$  CSE) ilyen bolygót eddig nem találtak. Érdekes, hogy az eddig ismert legnagyobb excentricitású ( $e \approx 0,85$ ) pályán keringő bolygót egy olyan tág ( $> 20$  CSE) kettős rendszerben fedezték fel, amelyben a bolygó csak az egyik csillagot kerüli meg.

A kettős rendszer mindkét csillagát megkerülő (cirkumbináris) bolygók mindegyike a stabilitási sugár közvetlen közelében, de azon kívül kering. Erre a jelenségre az adhat magyarázatot, hogy a protoplanetáris korongban lévő gáz hatására a bolygók pályasugara folyamatosan csökken. Azokat a bolygókat, amelyek migrációjuk során a stabilitási sugárnál beljebb kerültek, óhatatlanul elnyelte valamelyik csillag, így csak olyanokat láthatunk, amelyek migrációja megállt a stabilitási sugárnál.

A cirkumbináris bolygókkal kapcsolatban azt is tudjuk, hogy eddig mindegyik ismert bolygó pályája szinte egy síkba esik a kettőscsillag keringési síkjával. Azt is megemlíthetjük, hogy a méréseken alapuló statisztikai vizsgálatok szerint cirkumbináris bolygók azonos valószínűséggel keletkeznek szoros kettős rendszerekben, mint magányos csillagok körül.

Cikkünk következő részében a modern bolygókeletkezési elméleteket mutatjuk be, amelyek magyarázatot adhatnak az eddig felfedezett exobolygórendszerek és a Naprendszer eredetére.

## Ajánlott irodalom

- Armitage, P.: *Astrophysics of Planet Formation*. Cambridge University Press, 2010.  
Winn, J. N. Fabrycky, D. C.: The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems. *Annu. Rev. Astron. Astroph.* (2015), megjelenőben.



# A PAKSI ERŐMŰ ÉS A KÖRNYEZETI RENDSZEREK KÖZÖTT VÁRHATÓ KÖLCSÖNHATÁSOK

Borhidi Attila  
Pécsi Tudományegyetem, Biológiai Intézet

Mint minden nagyberuházás megvalósításának, a Paksi Atomerőmű kapacitásfenntartásának is előfeltétele a környezeti hatástanulmány szakzerű elkészítése, majd egy független szakértői testület által való elfogadása, végül pedig ennek alapján a Környezetvédelmi Hatóság által a beruházás környezetvédelmi engedélyezése vagy elutasítása. A környezeti rendszerek és a meglévő, valamint a megépítésre kerülő atomerőmű-blokkok működése során fellépő várható kölcsönhatások egy fontos része az élő környezetet érinti. Ezek felderítésére készültek a *Minta Értékű Biomonitoring* vizsgálatok.

A Minta Értékű Biomonitoring vizsgálatokat az MVM ERBE Zrt. két, valamint a Tölgy Természetvédelmi Egyesület huszonegy szakértője végezte, akik a legrangosabb hazai biológiai és környezettudományi intézmények (MTA Ökológiai Központ Intézeteinek, például a Magyar Dunakutató Intézet, egyetemek: SZIE, ELTE különböző karai tanszékeinek, a Magyar Természetudományi Múzeum Állat- és Növénytárának) legjobb szakemberei közül verbuválódtak a jelen feladat elvégzésére.

A monitoring alapjául az 1999 és 2003 közti időszak többéves adatgyűjtése szolgált, amelyre a 2012-es és a 2013-as évben célzott mintavételekkel végrehajtott szisztematikus flóra- és faunafelmérés épült, amely alkalmas volt a terület élőhelyeinek jellemzésére és dinamikájának előrejelzésére. Ez egyszerre alkalmasá tette a vizsgálatokat az atomerőmű-kapacitás fenntartásával járó várható környezeti hatások becslésére.

Mind a botanikai, mind a zoológiai monitoring két területi lehatárolás keretein belül történt: az atomerőmű 3 km-es körzetén belül, valamint a 10 km-es környezetén belül fekvő Natura 2000 területeken.

A botanikai felmérés kiterjedt a teljes edényes flórára, a különböző időpontokban készült flóralisták összehasonlító kritikai értékelésére mind a természetesség és védettség kritériumai, mind pedig a fajok előfordulása és gyakorisága szerint. Különös figyelmet fordítottak a vé-

dezt fajokra és az élőhelyeket veszélyeztető inváziós növényekre. Az élőhelyek kutatása során megállapították azok környezeti állapotát és természetességi fokát, térképezték az általuk elfoglalt területeket és azok kiterjedését, valamint a termőhelyek állapotát és értékelték a növénytársulások összetételét.

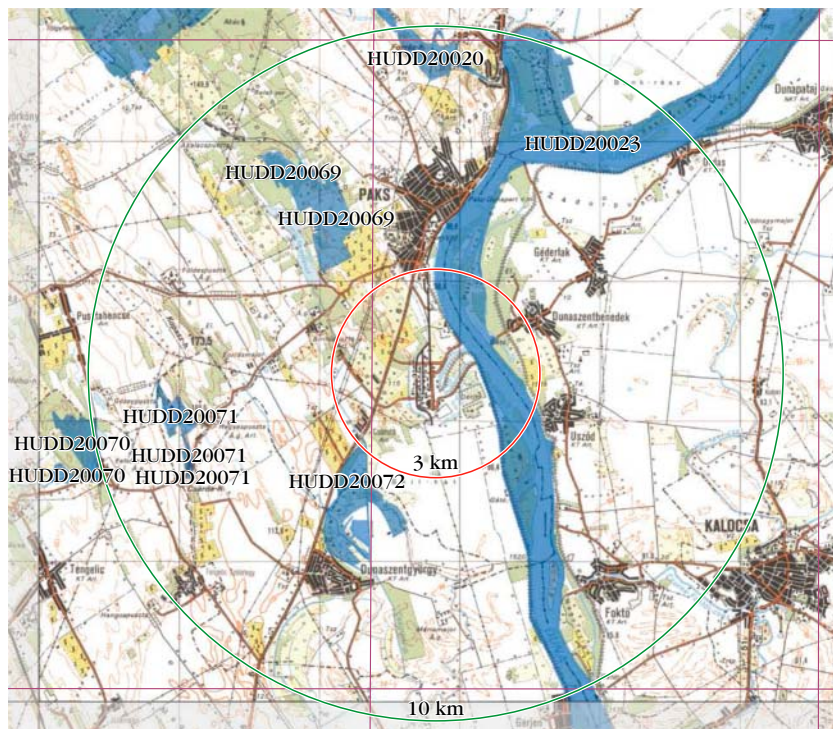
A felmérések az atomerőmű 3 km-es körzetében az alábbi 11 mintavételi termőhelytípusra terjedtek ki:

- a Duna árterülete,
- árvízvédelmi gát,
- Páskom,
- csámpai oldal,
- az atomerőmű környéki homoki gyepek,
- paksi és dunaszentgyörgyi mocsárerdők, mocsarak, láprétek,
- horgásztavak környéke,
- mezőgazdasági területek, mezőgazdasági utak melléke,
- a Paksi Atomerőmű belterülete és a csatlakozó részek (parkolók),
- csatornák és partjaik,
- Dunaszentbenedek község.

A célkitűzések a következők voltak:

- az edényes fajok taxonlistájának elkészítése,
- a védett fajok megjelenítése térképeken,
- csoportrészesedés diagramok készítése,

A paksi atomerőmű környezeti térképe a NATURA 2000-es területek feltüntetésével.



Az MTA Közgyűlésén, 2015. május 7-én, a Műszaki és a Fizikai Tudományok Osztályainak együttes tudományos ülésén elhangzott előadás szerkesztett változata.

- a felmérések szöveges értékelése,
- a területen előforduló vegetációtípusok szöveges bemutatása, értékelése,
- a terület vegetációtérképének elkészítése a főbb élőhelytípusok, illetve vegetációs egységek feltüntetésével.

A zoológiai felmérés a 3 km-es körzeten belül külön a vízi és a szárazföldi élőhelyekre, ezeken belül a 9 élőlénycsoportra, az emlősökön belül 5 fajcsoportra terjedt ki; a mintavételi helyeket térképeken és GPS segítségével is pontosan azonosították.

A vizsgálatok az alábbi 9 állatcsoportra terjedtek ki:

- vízi makroszkopikus gerinctelenek,
- egyenesszárnyú rovarok (*Orthoptera*),
- szitakötők (*Odonata*),
- lepkék (*Lepidoptera*),
- talajfelszíni ízeltlábúak,
- halak (*Pisces*),
- kétélűek (*Amphibia*) és hüllők (*Reptilia*),
- madarak (*Aves*),
- emlősök (*Mammalia*).

A 10 km-es körzeten belül 6 Natura 2000 terület ismételt felmérését végezték el, meghatározott minőségi szempontok (jelölő fajok megléte-hiánya, veszélyeztetettség mértéke) szerint. A területek komplex jellemzése tartalmazza a növényzeti élőhelyek és a megfigyelt jelölő állat-, illetve növényfajokat.

A paksi atomerőmű 10 km-es körzetében lévő NATURA 2000-es területek az alábbiak:

- *Közép-mezőföldi löszgyepek* (HUDD20020): a 10 km-es körbe eső D–K-i néhány 10 ha-os terület,
- *Tolnai-Duna* (HUDD20023): a 10 km-es körbe eső terület,
- *Paksi ürgemező* (HUDD20069): 352,14 ha,
- *Tengelici rétek* (HUDD20070): A 10 km-es körbe eső terület,
- *Paksi tarka sáfrányos* (HUDD20071): 91,16 ha,
- *Dunaszentgyörgyi-láperdő* (HUDD20072): 328,03 ha.

Az elvégzett monitoringvizsgálatok szakmai ellenőrzése során megállapították, hogy

1. Az atomerőmű környezetében az utolsó 10 évben bekövetkezett változásokban sokkal meghatározóbbak a klímaváltozások és a velük járó éghajlati szélsőségek, mint az erőmű által generált környezeti hatások.

2. Az atomerőmű 3 km-es környezetében tapasztalt legfontosabb környezeti tendencia az éghajlat melegedése és szárazodása. Ennek egyértelmű jele a nedves termőhelyek védett növényfajainak eltűnése vagy visszaszorulása és a szárazságtűrő, melegigényes fajok populációinak megerősödése, kiterjedése, a populáció méreteinek növekedése.

3. Az atomerőmű közeli és távolabbi körzetében lezajló természeti és környezeti változások – leszámítva az erőmű bővítése céljából közvetlenül igénybeveendő, nagyrészt a telephely belterületén fekvő területeket – részben a klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodások, részben a tájhasználatban beállott művelési változások hatásainak következményei.

## Két szakértői kérdés

1. Vajon 8-10 év múlva, a klímaváltozás által előidézett magasabb lég- és vízhőmérséklet mellett, tekintetbe véve a Duna vízhozamának csökkenését (a vízgyűjtő kevesebb klimatikus vízbevitelét és az öntözéses gazdálkodás várhatóan megnövekedő vízkivételét) és magasabb hőmérsékletét, a vízhűtés egymaga elegendő hűtést tud-e biztosítani a meleg- és hőségnapok több hétre elnyúló időszaka alatt, és nem szükséges-e egy kiegészítő léghűtéses „részegítés” pótlólagos üzemeltetéséről gondoskodni?

A kérdést az indokolja, hogy a felmérés korábbi szakaszában használt távlati klímamodellek által prognosztizált értékhatárok mind idő-, mind térléptékben túlságosan tágak, amelyek további finomítása szükséges. A klímaváltozással ugyanis új helyzet állt elő, nemcsak az vizsgálendő, hogy a létesítmény hogyan befolyásolja a környezetét, hanem az is, hogy a változó éghajlati környezetben hogyan biztosítható a létesítmény folyamatos működése. Erre utal a címben szereplő „kölcsonhatás” kifejezés. Az új regionális klímamodellek számítások alapján [1] a tervezett hűtési feltételek teljesülése a korábbiaknál lényegesen nagyobb valószínűségi pontossággal prognosztizálható.

2. Az atomerőmű frissvízhűtéses működése során keletkezett meleg víz, mint hulladék hő hasznosításának vannak-e sugárbiztonsági vagy egyéb technológiai akadályai, és ha nincsenek, nem lehetne-e ezt a hőmennyiséget a Dunába való visszavezetés helyett – bizonyos idő- és térbeli szakaszossággal – hatékonyabb formában is felhasználni?

Az elmúlt évben tárgyalások indultak az MVM Paks II. Zrt. és a Pécsi Tudományegyetem között arról, hogy az utóbbi intézmény környezetbiológiai tudásbázisa mivel és hogyan járulhat hozzá a Paksi Atomerőmű kapacitás-fenntartásának feladatához. Ebből a szempontból nem szerencsés momentum, hogy 2013-ban megszűnt az a Növényrendszertani és Geobotanikai Tanszék, amely az 1980-as és '90-es években az MTA Ökológiai Kutatóintézetével közösen kidolgozta a biomonitorozás azon elveit, módszereit és mutatóit, amelyeket ma Pakson sikeresen használnak.

Szerencsére az egyetem Természettudományi Karán 2005 és 2007 között egy Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretében részletesen vizsgálták a megújuló energiák hasznosításának kérdését. Az abban a programban szerzett tapasztalataink és eredményeink jól hasznosíthatók lehetnek azon aggodalomkeltési mozgalom – a tudomány eszközeivel történő – tompításában, amelyet az atomenergia-ellenes lobbik részben politikai indíttatással napjainkban is folytatnak.

## Irodalom

1. L. Dobor, Z. Barcza, T. Hlásny, Á. Havas, F. Horváth, P. Ittész, J. Bartholy: Bridging the gap between climate models and impact studies: the FORESEE database. *Geoscience Data Journal* (2014) doi: 10.5281/zenodo.9614.

# ATOMERŐMŰVI HULLADÉKOK KEZELÉSE – 1. RÉSZ

Fábián Margit  
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Az atomenergia-termelés jelenleg két fontos kérdést vet fel, amelyekre pozitív választ kell találni: az egyik a biztonságos működtetés, a másik a keletkezett radioaktív hulladékok megfelelő kezelése, tárolása. Jelen cikk a teljesség igénye nélkül ad átfogó képet a radioaktív hulladékok keletkezésének, kezelésének és tárolásának témaköreiről.

Az atomenergia-termelés elkerülhetetlen mellékterméke a kiégett nukleáris üzemanyag, amely hosszútávú biztonságos kezelést, tárolást igényel. Az atomenergetika számos területére vonatkozó szabályozását a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) ajánlása alapján lehet megfogalmazni. A legtöbb ország hatályos nemzeti szabályozásának – így a magyarországinak is – alapjaként ismert IBSS 1996-ban megjelent Safety Series sorozat 115. kötetében, a radioaktív hulladék definíciója:

– „radioaktív anyagokat tartalmaz vagy azokkal szennyezett, és aktivitása, illetve aktivitás-koncentrációja meghaladja a hatósági szabályozás alóli kivonás, illetve mentességi határát, valamint

– a hozzá tartozó sugárzási helyzet nincs kizárva a szabályozott tevékenységek köréből”.

A NAÜ ajánlások hulladékokra vonatkozó legfontosabb alapelvei: az emberi egészség, illetve a környezet védelme, az országhatárokon túlnyúló védelem, a jövő generációk egészségére gyakorolt hatás a ma elfogadhatónak tartottnál nem lehet nagyobb, valamint a hulladék kezelése a következő generációkra nem róhat indokolatlanul nagy terheket. A nemzeti törvényi keretek megalkotásának elve szerint a hulladékokat törvényes nemzeti keretek között kell kezelni, a hulladékok keletkezését a praktikusán elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani a radioaktív hulladékok keletkezésének szabályozásával. A biztonság érdekében a hulladékok keletkezésének és kezelésének összefüggéseit megfelelően figyelembe kell venni. Végül a létesítmények biztonságával kapcsolatban rendkívül fontos, hogy a radioaktív hulladékok kezelésére szolgáló létesítmények biztonságát azok egész élettartama során biztosítani kell [1].

A magyar szabályozás szerint: a nukleáris létesítményekkel, illetve az általuk termelt, valamint más tevékenységekből származó radioaktív hulladékokkal kapcsolatos hazai szabályozás feladata a nemzetközi egyezményekre épülő törvények és kormányrendeletek megalkotása. A jelenleg hatályos „atomtörvény” (1996. évi CXVI. törvény az atomenergiáról) alapvető rendeltetése a lakosság egészségének, biztonságának és a környezet védelme.

A biztonságos alkalmazás irányítása és felügyelete a kormány feladata. A magyar hatósági rendszer összetett, a törvényi rendelkezések az alapvető hatósági feladatokat megosztották az Országos Atomenergia

Hivatal (OAH) főigazgatója és az egészségügyért felelős miniszter között, de egyes kérdésekben jelentős szerepe van más tárcáknak is. Az atomenergiáról szóló törvényt végrehajtó egyik kormányrendelet 1998. január 1-jei hatállyal Központi Nukleáris Pénzügyi Alapot hozott létre, amelynek forrását az atomenergiát alkalmazó létesítmények befizetései képezik. Az Alap célja a radioaktív hulladéktárolók létesítésének, a kiégett fűtőelemek ideiglenes tárolásának és végső elhelyezésének, valamint a nukleáris létesítmények végleges leállításának, leszerelésének finanszírozása. Az „atomtörvény” egyik végrehajtási elemeként jelent meg a 47/2003. EszCsM-rendelet, amely definiálta, hogy a hulladéktároló végleges lezárását követően „... a lakosság vonatkoztatási csoportja egyedeinek sugárterhelése az elhelyezett hulladék hatásaitól eredően nem haladhatja meg a 100  $\mu\text{Sv}/\text{év}$  effektív dózis értéket”. Az OAH irányításával a radioaktív hulladéktárolók létesítésére, üzemeltetésére, fenntartására, valamint a nukleáris létesítmények leszerelésére 1998-ban létrejött a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. [2, 3].

## Radioaktív hulladékok: meghatározások, kategóriák

A *radioaktív hulladék* további felhasználásra nem szánt, emberi tevékenység, például ionizáló sugárzás alkalmazása során létrejött radioaktív anyag. A radioaktív hulladékokat – a hulladékkezelés és a biztonságos elhelyezés optimalizálása érdekében – keletkezésük szempontjából három kategóriába soroljuk: a nukleáris létesítmények működéséből származó folyamatos üzemi kibocsátás; üzem közben és leszereléskor keletkező, helyben maradó hulladékok; üzemzavar, baleset esetén keletkező hulladék (amit baleseti hulladéknak nevezünk).

A jelenleg érvényes, dózisalapú hatósági szabályozás a relatív *aktivitáskoncentráció* alapján különbözteti meg a radioaktív hulladékokat.

A tartalmazott aktivitáskoncentráció szerinti kis aktivitású hulladék kategóriájának alsó korlátját ez idő szerint a 124/1997. sz. Kormányrendelet és a hozzá kapcsolódó 23/1997. NM rendelet határozza meg, amely a gyakorlatban előforduló mesterséges és természetes eredetű radioaktív izotópokra *mentességi szinteket* állapít meg. A mentességi szintnél kisebb radioaktivitással vagy aktivitáskoncentrációval jellemzett anyag mentes a sugárvédelmi szabályozás alól, így ha hulladékká válik, akkor is szabadon (azaz nem radioaktív hulladékként) elhelyezhető. A radioaktív hulladékok minősítésére bevezetett (1) összefüggésben a mentességi aktivitáskoncentrációt egy tonna hulladékmennyiségig, a felszabadítási koncentrációt e

felett javasolják referenciaszintként alkalmazni. Az aktivitáskoncentráció szerinti jellemzés mérőszáma az  $S$  veszélyességi mutató:

$$S = \sum_i \frac{AK_i}{REAK_i}, \quad (1)$$

ahol  $REAK$  a referencia aktivitáskoncentráció (Bq/kg),  $AK$  az aktivitáskoncentráció,  $i$  a hulladékcsomag adott radioizotópja. Ha tehát egy hulladékcsomag veszélyességi mutatója egynél kisebb, akkor az radioaktív hulladékként történő kezelés és elhelyezés nélkül is csak elhanyagolható dózist okoz a leginkább érintett kritikus lakossági csoportnak.

Ennek alapján a NAÜ szerint a radioaktív-hulladék osztályok:

*Kis aktivitású hulladék* (LLW) veszélyességi mutatója:  $1 < S < 1000$ .

*Közepes aktivitású hulladék* (ILW) veszélyességi mutatója:  $10^3 < S < 10^6$ .

*Nagy aktivitású hulladék* (HLW) veszélyességi mutatója:  $S > 10^6$ . Ugyancsak HLW minősítést kap az a hulladék, amelyben a radioaktív bomlás következtében fellépő hőfejlődés (maradvány- vagy remanens hő) nagyobb, mint  $2 \text{ kW/m}^3$ . E kategóriákat Magyarországon a 47/2003. sz. EszCsM-rendelet, valamint a 14344/1-2004. sz. magyar szabvány definiálta.

Számos ország gyakorlatában, illetve a vonatkozó szakirodalomban a radioaktív hulladékokat (elsősorban a kiégett nukleáris fűtőelemeket, amelyek csak abban az esetben tekintendők hulladéknak, ha további felhasználásuk kizárható) sugárvédelmi szempontból az  $RT$  radiotoxicitással jellemzik, ami az alábbi definíció szerint a hulladék által összesen okozható dózist jelenti:

$$RT = \sum_{i=1}^n DCF_{i,ny} A_i, \quad (2)$$

ahol  $A_i$  a fűtőelembeli  $i$ -edik radionuklid aktivitása,  $DCF_{i,ny}$  az ezen radionuklidgez kapcsolódó lenyelési dóziskonverziós tényező. Ez a definíció nem azt feltételezi, hogy egyetlen ember inkorporálja az egész hulladékot, hanem kollektív dózist számol, azt feltételezve – ami meglehetősen valószínűtlen –, hogy a hulladékot a lakosság teljes mennyiségében inkorporálja.

A radioaktív hulladékkal feltöltött hulladéktároló veszélyességének minősítésére, azaz a hulladék és a befogadó létesítmény együttes jellemzésére egy komplexebb radiotoxicitás-indexet ( $RTOX$ ) alkalmaznak, ami az elhelyezett hulladék által a reprezentatív (leginkább érintett és leginkább érzékeny) személynek okozható éves effektív dózist jelenti:

$$RTOX = \sum A_i(t) \left( \sum_j mf_{i,j} Q_j \right) DCF_{i,ny} \text{ (Sv/év)}, \quad (3)$$

ahol  $A$  az aktivitás (Bq),  $i$  az adott radioizotóp,  $mf$  az egyes szennyezhető táplálékfajtákra vonatkozó mobilitási tényező [(Bq/kg)/(Bq)],  $Q_j$  a  $j$ -edik anyagból való

táplálékfogyasztás (kg/év);  $DCF_{ny}$  a lenyelési dóziskonverziós tényező (Sv/Bq). A mobilitási tényező helyspecifikus, tartalmazza a tárolóból való kijutás (migráció), a környezetben történő elterjedés (diszperzió) és a biológiai rendszerekben végbemenő felvétel (immisszió) sebességi és hígulási mutatóit is, ennél fogva meghatározása igen nehéz tudományos feladat.

## Nukleáris energiatermelésből származó radioaktív hulladékok keletkezése

A radioaktív hulladékok legfontosabb forrása a nukleáris energiatermelés. A nukleáris üzemanyagciklus minden fázisa az uránbányászattól az atomerőmű leszereléséig radioaktív hulladékok keletkezésével jár. A különböző forrásokból keletkező radioaktív hulladékok mennyiségét nehéz pontosan megadni, a magyarországi arányokat a hulladéktárolók befogadó térfogata révén lehet érzékelteni. A gyakorlatilag megtelt püspökszilágyi tároló teljes befogadó térfogata körülbelül  $5000 \text{ m}^3$ , ide nem nukleáris eredetű hulladékokat helyeznek el. A jelenlegi paksi 4 blokk üze- mi és leszerelési hulladékainak befogadására tervezett bátaapáti lerakó tárolókapacitása  $40\,000 \text{ m}^3$ , amely  $200 \text{ m}$  mélyen van a föld alatt. A hazai radioaktív hulladék mintegy 90%-a a nukleáris energiatermeléshez kapcsolódik.

### Az uránbányászat

Az uránbányászat felszínre hozza és egyes helyeken felhalmozza, dústítja az urán bomlási sorában található radioaktív izotópokat tartalmazó anyagokat, amelyek a felszínen megnövekedett sugárzást, illetve radioaktív kibocsátást eredményeznek. Az uránbányászathoz, illetve a feldolgozási lépésekhez köthető radioaktív hulladékok fő összetevői a természetes uránizotópok és a vele szinte minden esetben együtt előforduló természetes tórium, illetve ezek bomlási sorainak tagjai.

### Uránérc feldolgozása

A kitermelt érc urántartalmának kinyerése hidrometalurgia módzerekkel történik, azaz az érc savas vagy alkalikus oldatokkal való kezelésével. Az eljárás nagymértékben függ az uránt tartalmazó ásványok jellegétől, az érc minőségétől és az általános ásványi összetételétől.

### Uránérc dústítása

Az atomerőmű felépítésétől, valamint a moderátor anyagától függően a természetes urán 0,72%-os  $^{235}\text{U}$  tartalmát a legtöbb üzemanyagpushoz dústítással 3-4%-ra kell növelni, hogy a reaktorok üzemanyagához szükséges dústított uránt kapjunk. A fennmaradó szegényített uránt – nagyon nagy,  $18,7 \text{ kg/dm}^3$  sűrűsége miatt – például a hadiipar használja fel lövedékek és páncélzat készítésére. Az  $^{238}\text{U}$  radioaktivitása elha-

nyagolható, viszont az urán toxikus nehézfém (főleg vesekárosító hatása van). A szegényített urán a jövőben az új típusú gyorsreaktorok üzemanyagaként is alkalmazható lesz.

### Fűtőelemtípusok hulladékai

A különböző reaktorok többféle üzemanyagot alkalmaznak: természetes izotóparányú urán-dioxid ( $\text{UO}_2$ ) üzemanyagot például a nehézvízes ( $\text{D}_2\text{O}$ ) nyomottvízes reaktor használ; a MOX (mixed oxide fuel, vegyes oxid üzemanyag), azaz  $\text{UO}_2$  és  $\text{PuO}_2$  keveréket tartalmazó üzemanyagot alkalmaznak például európai nyomottvízes reaktorokban; dúsított  $\text{UO}_2$  üzemanyagot használ a könnyűvízzel ( $\text{H}_2\text{O}$ ) működő atomreaktorok túlnyomó része, például forralóvízes reaktorok (BWR) és a nyomottvízes reaktorok (PWR) többsége, ilyenek a Pakson működő VVER-440 blokkok is.

### Az atomerőmű üzemi hulladékai

Az atomreaktorok működése során keletkező radioaktív anyagokat a keletkezés módja szerint csoportokba soroljuk: hasadási termékek, urán és transzurán aktivációs termékek, fém szerkezeti anyagok aktivációs termékei, beton szerkezeti anyagok aktivációs termékei, vízkémiai aktivációs termékek.

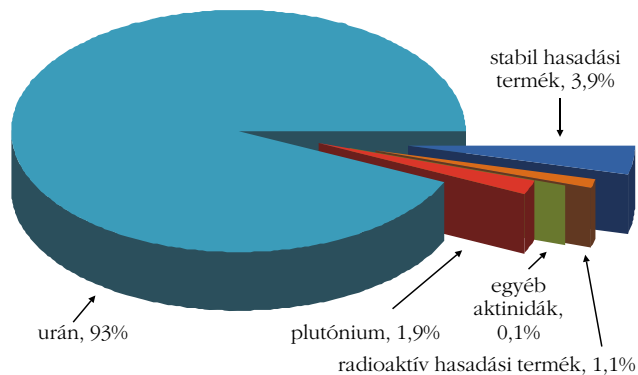
### Az atomerőműben keletkező kiégett üzemanyag

A kiégett üzemanyagot a legtöbb, reaktort üzemeltető országban a szabályozásban és a gyakorlatban is megkülönböztetik a radioaktív hulladékoktól, mivel további felhasználásuk lehetséges. A jelenleg működő atomerőművek többségében urándioxid-tablettákból álló üzemanyagot használnak. Az üzemelés során végbemenő hasadás és aktiváció eredményeként az üzemanyag összetétele jelentősen átalakul. A kiégett üzemanyag három fő elemcsoportból áll.

A kiégett üzemanyag tömegének nagy részét az urán két izotópjá adja; a hasadóképes  $^{235}\text{U}$  izotóp kezdeti dúsítása a friss üzemanyagban jellemzően 3-5%, a kiégett üzemanyagban az  $^{235}\text{U}$  koncentráció csökken (> 1%), ezért az üzemanyagot tovább használni már nem gazdaságos. A friss üzemanyag urántartalmának 95-97%-át kitevő 238-as tömegszámú izotóp gyakorlatilag csak gyors neutronok hatására hasad. A szóba jöhető valamennyi jelenlegi és tervezett, illetve építés alatti atomerőművi blokkban a termikus neutronok felhasználása van túlsúlyban, így ez az izotóp gyakorlatilag csak neutronbefogás útján fogy.

A reaktorban végbemenő láncreakció során az elhasadó atommagokból *hasadási termékek* keletkeznek, amelyek jellemzően a 95-ös és a 140-es tömegszám körüli tartományba esnek. A hasadási termékek között vannak radioaktív és stabil izotópok is.

Az  $^{238}\text{U}$ -ból és más izotópokból neutronbefogás és radioaktív bomlások útján *aktinoidák* keletkeznek (az aktinoidák a 89-es és a 103-as rendszám közé eső atomok). Legnagyobb mennyiségben hasadóképes



1. ábra. Az 50 MWd/kgU kiégésű  $\text{UO}_2$  üzemanyag jellemző összetétele.

$^{239}\text{Pu}$  keletkezik, amely a kiégés végén hasonló mennyiségben hasad, mint az  $^{235}\text{U}$ . A kiégett üzemanyag tárolása szempontjából legjelentősebb aktinoidák: a neptúnium, az amerícium és a kúrrium.

Az atomerőművekben felhasznált üzemanyag állapotát a kiégés mértékével jellemezzük, amely megadja, hogy egységnyi tömegű uránt (vagy uránt és plutóniumot) tartalmazó üzemanyagból mennyi energiát nyertek ki (MWnap, azaz MWd egységben) a reaktorban eltöltött idő alatt. Egy 50 MWd/kgU kiégésű üzemanyag jellemző összetételét mutatja a 1. ábra [4]. A radioaktív izotópok bomlásával újabb stabil izotópok keletkeznek, ezért a radioaktív izotópok részaránya folyamatosan csökken a tárolás során.

Az atomreaktor teljesítménye és a felhasznált üzemanyag dúsítása meghatározza az üzemelés során keletkező kiégett üzemanyag mennyiségét. Minél nagyobb teljesítményű egy atomerőművi blokk és minél kisebb az üzemanyag dúsítása, annál több kiégett üzemanyag keletkezik. A kiégés növelésével egy adott reaktornál csökkenthető a kiégett üzemanyag tömege. Egy 1000 MW teljesítményű blokk 60 éves üzemelése során körülbelül 1000-1500 tonna kiégett üzemanyag keletkezik.

Az üzemanyagban csak kis tömegben található aktinoidák szerepe fontos, hiszen a kiégett üzemanyag radiotoxicitásának nagy részét már az üzemidő vége után néhány évtizeddel ezek az izotópok adják.

Az urán és plutónium izotópjainak eltávolítása a kiégett üzemanyagból jelentősen csökkenti a hulladék radiotoxicitását. Ha az összes aktinoida eltávolítható lenne a hulladékból, akkor már 350 év után a természetes uránérc radiotoxicitásával megegyező lenne a hulladék radiotoxicitása. A kiégett üzemanyag relatív radiotoxicitása a kiégett üzemanyag egységnyi urántömegre jutó radiotoxicitásának és az egységnyi tömegű uránt tartalmazó természetes érc radiotoxicitásának aránya.

A kiégett fűtőelemben található radioaktív komponensek radioaktív bomlása következtében még hosszú időn keresztül hőfejlődés lép fel. A bomláshő számolásánál feltételezik, hogy a fűtőelem-kazettákat 3 évig tartják pihentető medencében, majd reprocesszálják. A reprocesszási folyékony hulladékokat egy évig pihentetik vitrifikálás (üvegesítéssel) kondicio-

nálás, szilárdítás) előtt. Így a vitrifikált hulladékok hőtermelési görbéje 4 évvel később kezdődik, mint a kiégett fűtőelemeké.

#### *A nyílt üzemanyagciklus*

A reaktorból kikerült kiégett fűtőelemek rövid felezési idejű izotópjainak nagy része a pihentető medencében töltött idő alatt lebomlik, ezáltal csökken a fűtőelemek hőtermelése is. A végleges nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló szempontjából csak az ezután is jelentős aktivitású izotópok fontosak. A fűtőelemek közvetlenül, feldolgozás nélkül kerülnek végleges elhelyezésre, ez esetben a kiégett fűtőelemeket nagy aktivitású radioaktív hulladéknak (HLW) tekintjük. Ezt a folyamatot nyílt üzemanyagciklusnak nevezik, lásd hátsó fedlapon felül. A nyílt üzemanyagciklus során elveszítjük az üzemanyagban lévő, nem elhanyagolható mennyiségű hasadóanyagot. Ez a feldolgozás nélkül elhelyezett hulladék nagy aktivitású és számottevő hőtermeléssel rendelkezik. A kiégett kazetták radiotoxicitása a természetes urán radiotoxicitását csak több százezer év után éri el. A kiégett üzemanyag végleges elhelyezésére elfogadott megoldás a mélygeológiai tárolók létesítése, ezeket olyan geológiai formációkban kell kialakítani, amelyek nagyon hosszú ideig biztosítják, hogy az ott elhelyezett radioaktív anyagok ne jussanak ki a bioszférába.

#### *A zárt üzemanyagciklus*

A reaktorból kikerült kiégett fűtőelemeket újra feldolgozzák, amelyet reprocessálásnak nevezünk. E folyamatnak két fontos előnye van: a kiégett üzemanyagból kinyerjük a hasadóképes izotópokat, így jelentősen csökkenthető a nagy aktivitású hulladékok mennyisége, aktivitása és radiotoxicitása.

A jelenleg ismert és ipari méretekben alkalmazott technológiával a fűtőelemekből kinyerik az uránt és a plutóniumot, amelyekből MOX fűtőelemeket gyártanak (hátsó fedlapon alul), a többi összetevő pedig

közepes aktivitású radioaktív hulladékként végleges tárolóba kerül, amelynek a radiotoxicitása néhány tízezer év alatt eléri a természetes uránércre jellemző szintet. Zárt üzemanyagciklust feltételezve a világ összes atomerőművében a végleges elhelyezésre szánt radioaktív hulladék térfogata 75%-kal, radiotoxicitása 90%-kal csökkenne a kiégett üzemanyag közvetlen elhelyezéséhez képest. Az újrafeldolgozással a természetes urán üzemanyaggyártásra felhasználása 25%-kal lenne csökkenthető [4].

#### *Az atomerőmű leszerelési hulladékai*

Az eddig lebontott atomerőművek leszereléskor keletkezett nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére még nincs példa. Egyrészt még nem működik mélygeológiai tároló, másrészt a nemzetközi tapasztalatok szerint a reaktortartály és az egyéb nagy aktivitású hulladékként számon tartott alkatrészek nem aktiválódtak fel olyan mértékben, hogy elhelyezésük csak a kiégett üzemanyag lerakására tervezett létesítményekben lenne megoldható.

Az üzemeltetés során elsősorban a reaktorból kivett komponensek (szabályozó kazetták abszorbensei, közbenső rudak, termoelemek stb.) felületein mérhető olyan mértékű dózisteljesítmény, amely miatt ezeket nagy aktivitású hulladékként kell kezelni.

*A radioaktív hulladékok kezeléséről és tárolásáról, valamint a hazai helyzetről a szeptemberi számban megjelenő 2. részben lesz szó.*

#### *Irodalom*

1. International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP #103, 2007
2. CXVI. törvény az atomenergiáról, 1996.
3. Országos Atomenergia Hivatal: Országos Atomenergia Hivatal hivatalos honlapja. <http://oah.hu>
4. Breitner D., Fábrián M., Hózer Z., Kókai Zs., Török Sz., Zagyvai P.: *A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai*. 2013.

## **Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet**

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

**Most Társulatunknak lenne szüksége  
egyletmentő ötletekre!**



**Ezek az ötletek nem vesznek el,  
ha a <http://forum.elft.hu>  
linken, az ELFT stratégiai vitafórumán adjuk elő.**



# MILLIKAN ÉS AZ ELEMI TÖLTÉS MEGHATÁROZÁSÁNAK TÖRTÉNETE – 1. RÉSZ

Buzády Andrea, Szegő Dóra<sup>1</sup>  
Pécsi Tudományegyetem TTK Fizikai Intézet

A Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (Comité International des Poids et Mesures, CIPM) a 2018-ban esedékes XXVI. Általános Súly- és Mértékügyi Konferenciára tűzte ki célul a Mértékegységek Nemzetközi Rendszere (Système International d'Unités, SI) revízióját [1], amelyben hét természeti állandó értéket rögzítik. Ennek következtében a hét fizikai alapmennyiség – és így minden származtatott mennyiség – definíciója is változik. A hét rögzíteni tervezett mennyiség között van az elemi töltés, ami majd az áramerősség mértékegysége, az amper definíciójául szolgál.

Az elemi töltés nagyságának megmérése *Robert Andrews Millikan* nevéhez fűződik. Millikan méréseinek eredménye, közlésének idején – az 1910-es években – nagy vihart kavart a tudományos közéletben, több tíz évig is eltartott, mire elfogadottá vált. Több mint 100 év múltán pedig olyan pontossággal tudjuk meghatározni ezt a természeti állandót, hogy értékét mértékegységrendszerünk egyik sarokkövének választjuk.

Millikan kísérletét, az elemi töltés nagyságának meghatározására szolgáló kísérlet elvét az iskolában tanítjuk, egyetemi hallgatói laboratóriumi gyakorlat keretében meg is valósítjuk. A részleteket illetően mégis több kérdés is felvetődhet, amelyeket érdemes felderíteni. Tanulságos megismernedni a kísérlet előzményeivel, buktatóival és fogadtatásával, valamint az eredeti publikációk alapján a kritikákkal is.

## Előzmények

Egészen a 19. század végéig az a nézet volt meghatározó, hogy a töltés – folytonos változóként – tetszőlegesen kis értéket felvehet. A mérés technika és tudományos gondolkodás fejlődésével azonban ez az elmélet megdőlni látszott. A századfordulóra egyre több jel mutatott arra, hogy mind az anyag, mind az elektromosság atomos szerkezetű. A többek által vizsgált katódsugárcsöves kísérletek során több félvezető megállapítás után *Joseph John Thomson* szögezte le, hogy a katódsugárzásban negatív töltésű részecskék haladnak. Ezzel felfedezte az elektront, az első kísérletileg azonosítható részecskét. A mérésekből azonban nem magát a részecskékhez tartozó töltés nagyságát, hanem a fajlagos töltés értékét, azaz az  $e/m$  hányadost lehetett megadni.

Az elemi töltés nagyságának meghatározásával ebben az időben több tudós is foglalkozott, Millikan az ő eredményeikre, ötleteikre, megállapításaira támaszkodott, azokból építette tovább a maga elképzeléseit.

Jelen tudományos közleményt a szerzők a Pécsi Tudományegyetem alapításának 650. évfordulója emlékének szentelik.

<sup>1</sup> Egyetemi hallgató.

A töltésmennyiség mérésekben használt ködkamrát *Charles Thomson Rees Wilson* skót fizikus 1895-ben fejlesztette ki. Ő eredetileg a felhőképződés és a nedves levegő optikai jelenségeinek kutatására építette. A tartályban lévő telített vízgőz adiabatikus expanziója nyomán lehűlés és kondenzáció következik be. Amennyiben egy töltéssel rendelkező részecske, például egy ion áthalad a kamrán, a víz lecsapódik azon, így láthatóvá válik a részecske útja.

A berendezést J. J. Thomson 1897-ben arra használta, hogy meghatározza a röntgensugarak által keltett ionok hordozta töltésmennyiséget. Az ismert feszültség alá helyezett, röntgensugarakkal megvilágított gázon átfolyó áramerősséget mérte, és kiszámította a gáz egysejnyi térfogatában lévő ionok  $n$  számának, az  $e$  iontöltésnek, valamint a pozitív és negatív ionok ismert feszültség hatására elért  $v$  sebességének  $nev$  szorzatát. E cikkben Thomson *Ernest Rutherfordra* hivatkozik, aki korábban már számos gáz ionsebességét publikálta, így  $n$  meghatározásával  $e$  kikövetkeztethető.

1903-ban a gázok kondenzációját vizsgálva (a fenti vel csak névrokonságban álló) *Harold Albert Wilson* szintén ezzel a módszerrel mért töltésmennyiségeket.

Millikan *On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas* című első cikke a témában 1908-ban jelent meg [2]. Ebben Wilson módszerével, ám azt néhány ponton módosítva próbálta meghatározni az elemi töltést. A cikk nem kapott nagy tudományos sajtóvisszhangot. 1910-ben a *A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge* című cikkében [3] Millikan az addigi ködkamrás módszer fejlesztéseként mutatta be az azóta híressé vált porlasztós berendezés elődjét. Az eszköz lényegében ugyanez volt 1913-as *On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant* című [4] munkájában is, de akkor már tanítványa, *Harvey Fletcher* javaslatára 1911-től nagy finomságú óraolajat használtak ionizálható közegként az addigi víz vagy alkohol helyett [5].

A mérésben rejlő buktatók, a hibák kiküszöbölésére Millikan nagy gondot fordított, az elemi töltés meghatározásának sikeres kísérletéről csak a két [3, 4] cikk áttekintése után kaphatunk teljes képet. Mielőtt azonban ezek részletesebb ismertetésére rátérnénk, röviden érintjük a mérések közös elvét.

## A mérés elve

A korábbi kísérletek során egy vízcseppekből álló felhő kondenzációs magvainak – Millikan mérésében az olajcseppek formájában jelen lévő közeg – mozgását figyelték meg levegőben. Mindegyik esetben valamilyen könnyen ionizálható – az egyértelműség ked-

véért a továbbiakban cseppként vagy részecskéként említett – közeg mozgásának sebességét határozták meg az eredő erő változtatása mellett. Először megmérték, hogy egy adott távolságot mennyi idő alatt tesz meg a csepp, amikor csak a nehézségi, a felhajtó és a Stokes-törvénnyel megadható közegellenállási erő hat rá. Ezután a megfigyelt térrészre elektromos teret kapcsolva a töltéssel bíró cseppet felfelé mozgatták. A felfelé és a lefelé irányuló mozgás idejét mérve, e két adatból vontak le következtetéseket.

### Mozgás elektromos tér nélkül

Az ionizált részecske mozgását elektromos tér jelenléte nélkül három erő befolyásolja: a nehézségi, a felhajtó és a közellenállási erő, ezt láthatjuk az 1. ábrán. Az összefüggésekben  $m$  a csepp tömege,  $r$  a sugara,  $\rho$  a sűrűsége,  $v$  pedig a sebessége; míg  $\rho_k$  a levegő sűrűsége és  $\eta$  a viszkozitása.

Miközben a csepp lefelé gyorsulva esik, a sebességgel lineárisan növekvő közegellenállási erő növekszik. Amikor a közellenállási erő nagysága megegyezik a nehézségi és a felhajtóerő különbségével, a csepp egyenletes sebességgel mozog. Figyelembe véve, hogy a csepp tömege felírható

$$m = V\rho = \frac{4}{3}r^3\pi\rho$$

alakban (melyben  $V$  a vizsgált csepp térfogata,  $\rho$  a cseppet alkotó közeg sűrűsége), az egyensúlyi állapot egyenlete:

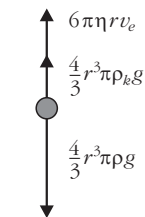
$$\frac{4}{3}r^3\pi\rho g - \frac{4}{3}r^3\pi\rho_k g - 6\pi\eta r v_g = 0,$$

ahol  $v_g$  az elért állandó sebesség. A vizsgált csepp sugarára tehát a következő adódik:

$$r = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{v_g \eta}{g(\rho - \rho_k)}}.$$

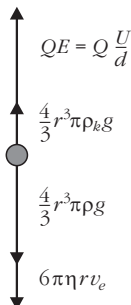
### Mozgás elektromos térben

A kísérlet második részében ugyanazon cseppet homogén elektromos térben mozgatták. Az egymástól  $d$  távolságra lévő kondenzátorlemezre kapcsolt  $U$  feszültség változtatásával a térerősség  $E = U/d$  nagysága változtatható. Egy ilyen térben a fenti 3 erőn felül egy  $F_{\text{elektr}} = QE$  elektromos erő is hat a  $Q$  töltésre, ahogy a 2. ábrán láthatjuk. Az  $E$  változtatásával elérhető, hogy a felfelé tartó mozgás egyenletes legyen, a  $v_e$  sebességre vonatkozó egyenlet:



1. ábra. A csepp mozgását befolyásoló erők elektromos tér jelenléte nélkül.

2. ábra. A csepp mozgását befolyásoló erők elektromos térben.



$$Q \frac{U}{d} + \frac{4}{3}r^3\pi\rho_k g - \frac{4}{3}r^3\pi\rho g - 6\pi\eta r v_e = 0.$$

A kísérletekben egy adott térrészen való áthaladás idejét mérve határozták meg a sebességeket. A megfigyelt csepp töltésére a csepp sugarát behelyettesítve felírható a következő összefüggés:

$$Q = 9\sqrt{2}\pi \sqrt{\frac{\eta^3 v_g}{g(\rho - \rho_k)}} (v_g + v_e) \frac{d}{U}. \quad (1)$$

A mért adatokból így kiszámolható egy csepp töltése. A modell szerint ezek a töltésadatok – természetesen a mérési hibán belül – az elemi töltés egész számú többszöröseként adhatók meg.

### A töltésmennyiség meghatározására szolgáló ködkamrás módszer továbbfejlesztése

Első mérésénél Millikan a Wilson-féle ködkamrás berendezés továbbfejlesztett változatát használta [3].

A vízcseppekből álló felhő kondenzációs magvainak ionizálásához – a besugárzás intenzitásának változását csökkentendő – nem röntgenlámpát, hanem rádiumot használt. Erősebb elektromos mező alkalmazásával az emelkedési és süllyedési sebességek különbsége mérhetően nagyobb lett, és a megfigyelt kisebb távolságokhoz tartozó rövidebb időtartamok alatt a párolgásból adódó pontatlanságok is csökkentek.

A teljesen más – itt nem részletezett – gondolatmenet követő Wilson a következő összefüggést használta a töltésmennyiség meghatározására:

$$Q = \left[ \frac{4}{3}\pi \left( \frac{9\eta}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \frac{g}{E} \frac{(v_g - v_e) \sqrt{v_e}}{\sqrt{\rho}}. \quad (2)$$

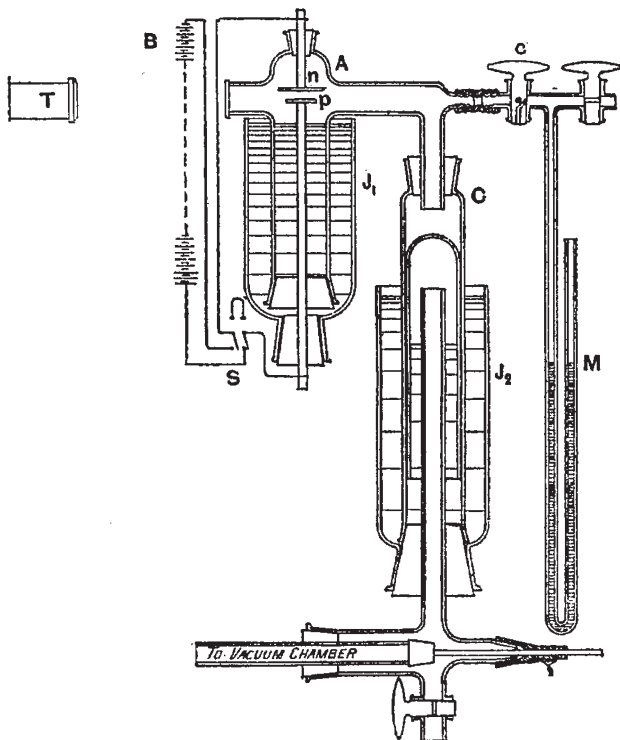
Millikan és *Louis Begeman* az 1908-ban kiadott publikációban [2] hivatkoztak Wilson eredményeire (konkrétan erre az összefüggésre), ezt az eredeti cikk jelöléseitől eltérően a fenti gondolatmenetben használt betűértelmezésekkel közöljük. Millikan a szögletes zárójelben lévő – a levegő viszkozitását tartalmazó – kifejezésre a Wilson által megadott  $3,1 \cdot 10^{-9}$  értéket használta. Ennek mértékegységét a cikkben nem közölték. Ekkor még feltételezték, hogy az ezen állandóban felmerülő hibák olyan csekélyek, hogy a végeredményt érdemben nem befolyásolják. Az elemi töltés nagyságára kapott eredmények azonban igen nagy szórást mutattak, akkori egységben  $3,66 \cdot 10^{-10}$  –  $4,37 \cdot 10^{-10}$  esu<sup>2</sup> között voltak, ez az SI mértékegységrendszerben  $1,22 \cdot 10^{-19}$  –  $1,46 \cdot 10^{-19}$  C-nak felel meg.

Millikan – Wilson módszerét elemezve – a következő öt lehetséges hibaforrást találta:

– A légáramlatok zavaró hatása miatt a felhők felső felszínét szinte lehetetlen volt torzításmentesen előállítani.

<sup>2</sup> Electrostatic unit; CGS-rendszerben *Benjamin Franklin* tiszteletére franklinnek is nevezik.





3. ábra. A ködkamrás berendezés rajza [3].

– Az elektromos térben eső felhők tetejének mozgását az elektromos jelenségek is befolyásolták, tovább nehezítve a pontos megfigyelést.

– A feltételezés szerint az expanzió során tökéletesen egyforma cseppeket kapunk, így  $v_e$  és  $v_g$  úgy jelenik meg az egyenletekben, mintha ugyanarról a csepről volna szó.

– A megfigyelés időtartama alatt a párolgási jelenség nem elhanyagolható, emiatt nem teljesül, hogy a felhő egyenletesen esik.

– Wilson feltételezte, hogy a levegő az expanzió, illetve a kondenzáció után egyensúlyi hőmérsékleten van. Ezt a hőmérsékletet a telített gőzök adiabatikus expanziójára vonatkozó összefüggések és ezen gőzök hőmérséklete és sűrűsége közötti – kísérleti úton meghatározott – összefüggések alapján számította ki.

Az utóbbi hibaforrás kiküszöbölése miatt Millikan különös figyelmet fordított a kamra expanzió utáni hőmérsékletére. Az ennek vizsgálatát is lehetővé tévő berendezés látható a 3. ábrán.

A körülbelül 5 cm átmérőjű  $A$  és  $C$  üvegtartályokban lévő levegő hőmérsékletét az őket körülvevő  $J_1$  és  $J_2$  víztartályokban lévő víz hőmérsékletének szabályozásával lehetett stabilan tartani. Az adiabatikus expanzió során bekövetkező nyomásváltozást az  $M$  higanymanométerrel mérték, ami a  $c$  csapon keresztül csatlakozott az üvegtartályok légteréhez. Az  $n$  és  $p$  kondenzátorlemezek közötti feszültséget biztosító  $B$  áramforrást egy  $S$  kapcsolóval lehetett bekapcsolni az áramkörbe. A kondenzátorlemezek között kialakuló felhő mozgásának megfigyelésére egy rövid fókusztávolságú  $T$  teleszkóp szolgált. Az expanziót valószínűleg az ábra alsó részén látható egységgel valósították meg, ennek működését azonban a cikkben nem részletezték.

1. táblázat

A levegő viszkozitásának vizsgálatából származó adatok

közeg	$\eta$	$\frac{4}{3} \pi \left( \frac{9\eta}{2g} \right)^{\frac{3}{2}}$ értéke	relatív eltérés (%)
telített vízgőz	0,0001904	$3,422 \cdot 10^{-9}$	10,39
telített alkoholgőz	0,0001878	$3,353 \cdot 10^{-9}$	8,16

Wilson és J. J. Thomson megfontolásaira hivatkozva Millikan kiszámolta a felhő expanzió nyomán bekövetkező hőmérséklet-csökkenésének mértékét. A modell alapján beállt egyensúlyi hőmérséklet  $14,2$  °C-nak adódott. A szoba, illetve a víztartályok  $26$  °C-os hőmérsékletéhez képesti  $12$  °C-os különbség miatt a higanymanométerben higanyszintváltozásnak kellett volna mutatkoznia. Mivel ilyen szintváltozást nem tapasztaltak, Millikan arra a következtetésre jutott, hogy mire a felhő mozgásának megfigyelése – az expanzió után körülbelül 2-3 másodperccel – lehetségessé válik, a hőmérséklet a megfigyelhetőség határában belül nem különbözik a szoba hőmérsékletétől.

A csepp mozgását befolyásoló viszkozitás függ a hőmérséklettől, mivel a fenti módszerrel csak a tartályok átlagos hőmérsékletét lehetett meghatározni, Millikan az  $n$  és  $p$  kondenzátorlemezek közötti térrészben uralkodó hőmérséklet fenténél még pontosabb meghatározására törekedett. Ehhez egy  $0,025$  mm-es vas és  $0,075$  mm-es platinadrótokból készült bimetált használt. Az eszköz kellően kicsi hőkapacitása biztosította, hogy igen kis késéssel reagáljon az őt körülvevő gáz hőmérsékletének megváltozására. A bimetált a kondenzátor fegyverzetei közé helyezve megállapítható volt, hogy az adiabatikus expanzió miatti hőmérséklet-változás során bekövetkező mechanikus elhajlást követően az elmozdulást jelző skála tíz másodpercen belül a kezdeti helyzetbe állt vissza.

Ezen túlmenően Millikan többféle módszerrel is próbálta a hőmérsékletet meghatározni. Végkövetkeztetése azonban minden alkalommal ugyanaz volt: a kondenzátorlemezek közötti hőmérséklet  $6$  másodperccel az expanzió után már nem különbözött mérhetően a szoba hőmérsékletétől.

A hőmérsékletmérések gondos kivitelezése mellett Millikan figyelmet fordított a közeg viszkozítására is. Hivatkozva mások nagyon körültekintő méréseire, a  $26$  °C-os száraz levegő viszkozitásának értékét átvette tőlük. A vízzel, illetve alkohollal telített gőz száraz levegőéhez viszonyított viszkozitását viszont Millikan kérésére a Ryerson laboratóriumban Fred Allison határozta meg kapilláris viszkoziméter segítségével. Az 1. táblázatban a  $26$  °C-os víz, illetve alkohol gőzével telített levegő viszkozitásának adatai – ahogy a [3]-as publikációban is – mértékegységek nélkül szerepelnek.

A harmadik oszlopban a (2)-es összefüggés szögletes zárójelében szereplő kifejezés értékét, a negyedikben pedig a száraz levegő viszkozitásával ( $0,0001826$ ) számolható elemi töltés értékétől való eltérés relatív hibáját láthatjuk.

2. táblázat

**Millikan és Begeman eredményeinek összesítése [3]**

sorozat*	töltésszám	eredmény		tömegarány
		( $10^{-10}$ esu)	( $10^{-19}$ C)	
1.	3	4,59	1,531	7
2.	4	4,56	1,521	7
3.	2	4,64	1,548	6
4.	5	4,83	1,611	4
5.	2	4,87	1,624	1
6.	6	4,69	1,564	3
Számítási közép		4,70	1,568	
Súlyozott átlag		4,65	1,551	

\* Az adatsorok az 5. sorozatnál alkoholecseppek, a többi esetben vízcseppek megfigyeléséről készültek.

Millikan a kísérletek során felismerte, hogy felhő ugyan nem, de porlasztással előállított, önálló cseppeket nagyon jól, kontrolláltan lehet az elektromos tér erősségének változtatásával egyensúlyozni. Így a kezdeti próbálkozások után ezt a módszert követte. A megfigyelőtérbe kis mennyiségű vizet porlasztva 7-8 másodpercen belül kiszámú, könnyen megfigyelhető – a be rendezés sötét hátere előtt világító pontokként jól látszó – csepp formálódott. Az expanzió variálásával a csepp tömegét, a besugárzás változtatásával azok töltését is tudta változtatni, így akár többszörösen töltött részecskéket is elő tudott állítani.

A kondenzátorlemezek közötti tér keskeny sávját megvilágító vékony fénysugár melegítő hatását három vízcella alkalmazásával küszöbölték ki, ezekről még lesz szó a későbbiekben. A lemezek közötti levegőt 200 mg 20000 Bq aktivitású, a kondenzátortól 3–10 cm közötti távolságban lévő rádiumizotóp ionizálta. A sugárforrást az expanzió után 1-2 másodperccel eltávolítva vagy leárnyékolva figyelte meg a formálódó cseppek mozgását.

A mért adatok értelmezése során Millikan részletes megfontolásokat közölt arról, hogy a cseppek 35-60 másodperces élettartama alatt – szigorúan véve – nem lehet biztosítani az egyenletes mozgást, többek között a nem elhanyagolható párolgás miatt. Mivel a megfigyelésekből származó adatsorok rendre egy-egy cseppről készültek, a (2) egyenletben nem fordulhatott elő átlagszámításból fakadó eltérés. Millikan arra jutott, hogy a probléma a közegellenállási erő hatását figyelembe vevő modellben rejlik, azaz a Stokes-törvény nem érvényes eredeti formájában. Az 1913-as kísérletnél [4] láthatjuk majd, hogy ennek különösen az igen kis méretű cseppek esetén van jelentősége.

Millikan a kísérletek során különböző töltésű és különböző – egymáshoz viszonyított tömegű – cseppek mozgását megfigyelve elemezte, hogyan teljesülnek a modell feltételei a kísérleti megvalósítás során. A 2. táblázatban az adatsorok az 5. sorozatnál alkoholecseppek, a többi esetben vízcseppek megfigyeléséről készültek. Ezekben a mérésekben tehát Milli-

3. táblázat

**Millikan 1910-es eredményei, néhány kortársával összehasonlítva**

név	eredmény		relatív eltérés (%)
	( $10^{-10}$ esu)	( $10^{-19}$ C)	
Millikan	4,65	1,551	
Planck	4,69	1,564	-0,838
Rutherford és Geiger	4,65	1,551	0
Regener	4,79	1,598	-3,030
Begeman	4,67	1,558	-0,451
Ehrenhaft	4,6	1,534	1,096
de Broglie	4,5	1,501	3,223

kan már porlasztással előállított cseppek mozgását figyelte meg, de a cseppek még könnyen párolgó folyadékból származtak.

Millikan ebben az 1910-es cikkében [3] öt kortársa – kísérleti úton nyert, illetve elméleti megfontolásokból származó – eredményeivel (3. táblázat) vetette össze sajátját, majd az ezen adatokból számolt átlagot tekintette az elemi elektromos töltés nagyságának. Ez korabeli mértékegységben  $4,69 \cdot 10^{-10}$  esu, ma használatosban  $1,564 \cdot 10^{-19}$  C volt.

Az eredmények nagy port kavartak a korabeli tudományos életben: Niels Bohr elfogadta Millikan  $e$  értékét, és felhasználta 1913-as cikkében (*On the Constitution of Atoms and Molecules*); mások azonban kételkedve fogadták.

*A következő rész a híres olajcseppek kísérlet kivitelezésének és kiértékelésének részletes bemutatásával foglalkozik. Továbbá elemezzük Millikan eredményeinek akkori és mostani megítélését is.*

#### Irodalom

1. Bureau International des Poids et Mesures: Resolution 1 of the 25<sup>th</sup> CGPM (2014). <http://www.bipm.org/en/news/full-stories/si-roadmap.html>
2. R. A. Millikan, L. Begeman: On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas. *Physical Review* 26/2 (1908) 197–198.
3. R. A. Millikan: A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 6/110 (1910) 209–228.
4. R. A. Millikan: On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant. *The Physical Review* 2/2 (1913) 109–143.
5. H. Fletcher: My work with Millikan on the oil-drop experiment. *Physics Today* 35 (1982) 43–47.
6. F. Ehrenhaft: Über die kleinsten messbaren Elektrizitätsmengen. Zweite vorläufige Mitteilung der Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 4 (1910) 118–119.
7. F. Ehrenhaft: Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons zu unterschreiten scheinen. Zweite vorläufige Mitteilung seiner Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 5 (1910) 215.
8. G. Holton: Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan-Ehrenhaft Dispute. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 (1978) 161–224.

# FIZIKUS TEHETSÉGPONT A KÉT HÁBORÚ KÖZÖTT

## Faragó Andor, a Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok megindítója és első szerkesztője

Radnai Gyula  
ELTE Fizikai Intézet

A 21. századból visszatekintve az oktatásügy szempontjából szerencsének mondhatjuk, hogy 1922-ben *Klebelsberg Kunó* (1875–1932) lett Magyarország kultuszminisztere. Debrecenben, Pécsen és Szegeden jól átgondolt egyetemi építkezésekbe fogott, Bécsben, Berlinben, Rómában létrehozta a Collegium Hungaricumokat. Az ő hívására jött haza és kapott méltó helyet a hazai tudományos életben *Szent-Györgyi Albert* (1893–1986) és *Bay Zoltán* (1900–1992). Felkarolta a természet- és műszaki tudományokat, elérhető hazai és külföldi ösztöndíjak rendszerével támogatta a magyar kutatókat. Az egyetemi oktatás újjászervezésében a gyakorlatiasabb oktatásra helyezte a hangsúlyt, előtérbe állította a reáltudományokat.

1922-ben a matematikában és fizikában tehetséges középiskolai tanulók számára újra indultak a Társulat tanulóversenyei. Ebben az évben matematikából *Kalmár László* (1905–1976), fizikából *Reguly Zoltán* (1904–1952) lett az első. 1923-ban *Pintér Jenő* (1881–1940) megszervezte először Budapesten, majd az egész országra kiterjedően az Országos Középiskolai Tanulmányi Versenyt minden fontosabb tantárgyból, így matematikából és fizikából is, azonban lényegesen más feltételekkel, mint amelyek a Társulat versenyein voltak érvényesek. Nem indulhatott bárki az OKTV-n, tantárgyanként csupán egyetlen versenyző minden középiskolából. Nem lehetett használni segédeszközöket (saját könyveket, szótárakat, jegyzeteket) a zárthelyi dolgozat elkészítéséhez, így a kreativitás helyett a memória vált döntő tényezővé. Nem lehet csodálni, hogy matematikából és fizikából az OKTV-n kitűzött feladatok színvonala általában alacsonyabb volt a társulati versenyek színvonalánál. Csakhogy a társulati versenyeken meglehetősen kicsi volt a résztvevők száma, olykor a 30-at se érte el. Egyre jobban érződött az 1914-ig *Rácz László* (1863–1930) által szerkesztett *Középiskolai Matematikai Lapok* tehetségfelkaroló és fejlesztő munkájának hiánya.

1924-ben két fontos törvénytervezetet terjesztett Klebelsberg Kunó a parlament elé, és az országgyűlés mindkettőt elfogadta. A legutóbbi, hasonló horderejű törvény még 1883-ban, *Trefort Ágoston* (1817–1888) minisztersége idején született.

Az 1924/11. törvénycikk legfontosabb két eleme a reálgimnázium létrehozása és az egyetemi továbbtanulás szempontjából egységes jogosítás elvének bevezetése volt. Megszűntek a főgimnáziumok és a főreáliskolák, helyettük gimnáziumok, reáliskolák és reálgimnáziumok jöttek létre. Az ország középiskoláinak több mint a fele reálgimnázium lett, egységes, a reáltantárgyakat kiemelten kezelő tanrenddel. Az egysé-

ges jogosítás elve azt jelentette, hogy mindegyik középiskolából ugyanolyan joggal jelentkezhetett bárki bármelyik egyetemre.

Az 1924/27. törvénycikk a középiskolai tanárok képzéséről rendelkezett, legfontosabb eleme az egyetemek mellett működő tanárképző intézetek megerősítése volt. A tanárszakos hallgatóknak az egyetemmel párhuzamosan be kellett iratkozniuk a tanárképző intézetbe, így nemcsak egyetemi, de tanárképző intézeti lecke-könyvük is lett. Mint arról például a *Bakos Tibor* (1909–1998) hagyatékában megőrzött iratokból is meggyőződhetünk, az egyetemi vizsgarend a matematika-fizika szakon nem sokat változott. 1924 után is volt másodév végi alapvizsga és a negyedév végi szakvizsga, amelyet ugyanannál a vizsgabizottságnál kellett letenni. *Mindkét szaktárgyból* kötelező volt szakdolgozatot írni a negyedik év végéig. Az ötödik évet azután végig a tanárképző intézeti gyakorlóiskolában kellett eltölteni.

Hogyan is született meg a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok*?

1924-ben, a Klebelsberg-féle oktatási törvénycikkeket elfogadásakor már 10 év is eltelt azóta, hogy nem sokkal az első világháború kitörése előtt *Rácz László* beszüntette a *Középiskolai Matematikai Lapok* szerkesztését és kiadását. Hozzáértő szakmai körökben ekkor már érezhető volt a matematikai és fizikai tehetségek gondozásában, fejlesztésében fontos szerepet játszó lap hiánya. Jó középiskola, benne jó tanár, ha nem is túl sokan, de voltak Budapesten. Az egyik ilyen volt a Tavaszmező utcai középiskola, ahol egy Sopronból felkerült, szakmailag kiváló tanár, bizonyos *Faragó Andor* (1877–1944) tanította a matematikát és a fizikát.

A Tavaszmező utcai iskolát, amely három éve viselte már *Zrínyi Miklós* nevét, ősszel reálgimnáziummá avatták. *Faragó Andor* ekkor már negyedik éve volt itt a fizikaszertár őre, és ebben a tanévben barátja, volt egyetemi évfolyamtársa, *Erdős Lajos* (1879–1942) is megkapta ezt a címet és feladatot a pestszenterzsébeti *Kossuth Lajos reálgimnáziumban*. Másik tanár barátja, *Nagy L. József* (1882–1962) 1919 óta újra a budapesti piarista gimnáziumban tanított, 1923-ban jelent meg az általa átdolgozott *Fehér-Szekeres-féle fizikatan-könyv* első kötete, 1924-ben a második kötet. *Faragó Andor* azonnal áttért ezekre a tankönyvekre. Mindhárom aktív tagjai voltak az *Eötvös Loránd Matematikai és Fizikai Társulatnak*, ahol nyilván felvetődött, hogy újra kellene indítani a Lapokat.

Ekkor már *Nagy L. József kolozsvári fizikaprofesszora*, *Tangl Károly* (1869–1940) is a budapesti tudo-

mányegyetemen működött, *Eötvös Loránd* halála után őt bízták meg a Kísérleti Fizikai Intézet vezetésével. Biztos, hogy valamennyien helyeselték, feltehetően szorgalmazták is a Lapok újraindításának gondolatát. Az erkölcsi támogatáson túl anyagi támogatásról is szó lehetett, minthogy Klebelsberg Kunó törekvéseivel összhangban állt a folyóirat célja, a matematikai és fizikai tehetségek kiválasztása, fejlesztése, gondozása. Nem tudni, ki javasolta, hogy a „fizikai” jelző is kerüljön be a Lapok nevébe, ahogyan benne van a Társulat nevében is, de biztosak lehetünk abban, hogy mindannyian egyetértettek ezzel. Már csak vállalkoznia kellett valakinek a Lapok szerkesztésére és kiadására.

Faragó Andor vállalkozott rá. Megszerezvén a szükséges minisztériumi engedélyeket és támogatást, 1925. januárban már nyomdában volt és február 1-jén megjelent a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* első száma. Egy-egy példány ára tízezer inflációs korona volt – még két évig váratott magára az új fizetőeszköz, a pengő bevezetése. (Rátz László újságja a „békebeli időkben” csaknem két évtizeden át ugyanannyiba, 60 fillérbe került.)

Nem volt ebben az első számban semmi bevezető magyarázkodás, *in medias res* a *Bernoulliakkal* kezdte Faragó Andor az újságot, nem kevesebbel, mint a brachistron-problémával.<sup>1</sup> Azután Nagy L. József cikke következett a kristálydetektorokról, majd újra egy Faragó-írás egy minimumprobléma elemi megoldásáról. Kisebb közlemények, „matematikai szórakozások”, az 1924-es OKTV tételek bemutatása után kitűzött indulásnak 15 gyakorlatot és 18 feladatot matematikából, majd 8-at fizikából, és várta a postán érkező megoldásokat.

Azok pedig hamarosan meg is érkeztek, a szerkesztő, valamint az akkori tehetséges középiskolások és tanáraik legnagyobb örömére. *Radványi László* tanár úr, aki egykor maga is megoldója volt a Rátz László szerkesztette Lapoknak, most vidáman nyomta tanítványa (Bakos Tibor) kezébe Szombathelyen az új Lapokat: „Itt van pupák, most mutasd meg, mit tudsz!” Ő pedig megmutatta. Fényképe egy év múlva az első oldalon szerepelt az újságban, ahol Faragó Andor, új

hagyományt teremtve, szép, fényes papíron közölte a legjobb megoldók fotóit.

A Faragó-lapokról az első rövid, bemutató értékelés 1926-ban jelent meg a *Tanáregyesületi Közlönyben*. A következő év tavaszán a *Magyar Középiszkola* már részletes áttekintést adott az egész elmúlt évfolyamról *Borosnyay Szeréna* (1881–?), a Mária Terézia Leánylíceum tanárának tollából. A Társulat tudományos folyóirata, a *Matematikai és Fizikai Lapok* elvből nem közölt recenziókat, így nem adhatott hírt a Faragó-lapok megjelenéséről sem.

1927-ben jelent meg Budapesten Nagy L. József és Faragó Andor közös kiadásában A *Matematikai és Fizikai Lapok Könyvtárának* 1–2. száma *Kiváló matematikusok és fizikusok* címmel. Az akkor már a váci piarista gimnáziumban tanító Nagy L. József volt a könyv szerkesztője és ő írta meg benne *Archimedes* és *Galilei* életrajzát is a diákok számára. Az előszót Tangl Károly professzor írta. Még ez év tavaszán közölt e könyvről kedvező bírálatot a *Tanáregyesületi Közlöny*. A recenzió szerzője *Mende Jenő* (1883–1944), aki akkor a Kölcsey gimnáziumban tanította a fizikát, *Novobátzky Károly* (1884–1967) kollegjaként.

1929-ben, Eötvös Loránd halálának 10. évfordulója alkalmából Szegeden jelent meg A *Matematikai és Fizikai Lapok Könyvtárának* 3–5. száma: *Kürschák József* (1864–1933) *Matematikai ver-*

*senyétélek* című munkája. Ebben az 1894 óta folyó társulati tanulmányversenyek több mint három évtizedének matematika feladatait dolgozta fel a szerző igényesen, nagy szakmai és metodikai hozzáértéssel. Ez a könyv, kiegészítve az azóta született folytatásokkal, amelyeket *Hajós György* (1912–1972), *Neukomm Gyula* (1892–1957) és *Surányi János* (1918–2006) neve fémjelez, ma is egyik fő segítség a már Kürschák Józsefről elnevezett tanulmányversenyre készülő diákok és tanáraik számára. Miért éppen Szegeden jelent meg Kürschák József könyve? Mert a megjelenéshez a minisztérium támogatására is szükség volt, és azt így lehetett biztosítani. A Faragó Andor – Nagy L. József szerkesztőpáros vállalkozásához a támogatást valószínűleg az ugyancsak piarista *Kornis Gyula* (1885–1958) szerezte meg, aki akkor államtitkár volt Klebelsberg Kunó minisztériumában. Kürschák köszönetet is mondott a minisztériumi támogatásért a könyv előszavában. És ki írta az első lelkendező recenziót a könyvről 1930-ban, a *Tanáregyesületi Közlönyben*? Nem más, mint Faragó Andor barátja, Erdős Lajos matematika-fizika szakos tanár, a későbbi híres magyar matematikus, *Erdős Pál* (1913–1996) édesapja.

VI. évfolyam. 9–10. szám. 1930 május–június 15.

## KÖZÉPISKOLAI MATEMATIKAI ÉS FIZIKAI LAPOK

SZERKESZTI

FARAGÓ ANDOR

A BUDAPESTI SZ. KIR. ÁLL. ZENYVI MIKLOS REALGIMNÁZIUM TANÁRA.

TARTALOM:

DR. SÁRKÓZYPÁL: A TCHÉBICHEF-polinok egy speciális esete.

DR. KLUG LIPÓT: Az V. évi. 9–10. számában kitűzött pályaféltel megoldása.

Megoldások:

a) Gyakorlatok (509, 515–524.)  
b) Feladatok (456, 570–580.)

c) Fizika (277–282.)

*Ábrázoló geom.* (CLXIX–CLIV. új CLXIII–CLXVI)

*Kitűzött gyakorlatok* (539–546.)

*Kitűzött feladatok* (593–602.)

*Kitűzött fizikai feladatok* (288–292.)

A VI. évfolyam tartalomjegyzéke és a legszorgalmasabb tanulók arcképei.

Megjelenik minden hó tizenötödikén, július és augusztus kivételével.

Előfizetési ár egy évre 8 pengő, félévre 4 pengő.

Ezen szám bolti ára: 240 pengő.

Szerkesztőség és kiadóhivatal: IX. Lónyay-utca 46, III. l.

Telefonszám: Aut. 874–45.

Postataárközpénziári csekk számla 38182.

BUDAPEST

1930.

<sup>1</sup> A brachistron (brachisztochron) probléma annak a görbének a megkeresése, amelyen – súrlódásmentes esetet feltételezve – a leggyorsabban legurul egy golyó az állandónak modellezett nehézségi erő hatására. A golyó mozgásának periódusideje (amíg a golyó az egyik véghelyzetről az ellenkező oldalra gurul és vissza az eredeti pozíciójába) nem függ az indítás magasságától akkor, ha az ellenállásokat elhanyagoljuk. A brachistron-probléma megoldása a ciklois.

Erdős Lajos a Lapok megindítása óta szíven viselte Faragó Andor vállalkozásának ügyét. *Az atomok világában* címmel öt részes közleményt jelentetett meg a Lapok induló számaiban, amelyben a statisztikus fizika és általában a modern fizika újabb eredményeit tárta érthető módon a Lapokat olvasó diákok elé. Most se mulasztotta el megjegyezni: „Felesleges rámutatni a Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok hasonlíthatatlan fontosságára; a múltban is ez volt a korán megnyilatkozó tehetségek gyakorló tere és most is ennek munkatársai közül kerülnek ki a különböző versenyek győztesei.” Kétoldalas recenziójának végén egészen személyes hangot ütött meg, midőn felidézte egykori – Faragó Andorral együtt töltött – egyetemi éveit: „Immár harminc esztendeje annak, hogy Kürschák József előadásait hallgattam és könyvének olvasása alkalmával ezek az előadások elevedtek meg. Ugyanazzal a féltő gondnal és szeretettel írta meg ezt a könyvét, mint ahogy bennünket bevezetett a szabályos számsorozatok, meg a projektív sugársorok misztériumaiba; a madár tanítja így repülni a fiait, hogy megerősödve tudjanak szembeszállni az igazi nehézségekkel. A szeretet adománya ez a könyv, a szeretet és a kegyeleté, mert nem véletlen az sem, hogy éppen tíz évvel Eötvös Loránd halála után jelent meg. Mi magyar tanárok megértettük a Mester szavát és intencióinak megfelelően fogjuk felhasználni.”

Kikkel dolgozott együtt Faragó Andor, akiket sikerült megnyernie, hogy cikkeket, tanulmányokat írjanak a diákok számára? A már említett Nagy L. József és Erdős Lajoson kívül álljon itt néhány név a cikkírók közül:

„Matematikai értekezést” írt többek között *Adler Ernő* (?–?), *Arany Dániel* (1863–1945), *Balyi Ferenc Károly* (1897–1975), *Bella Andor* (?–?), *Bodócs István* (1887–1965), *Csada Imre* (1884–1955), *Egerváry Jenő* (1891–1958), *Elek Tibor* (1910–1972), Erdős Pál, *Fejes László* (1915–2005), *Goldziher Károly* (1881–1955), *Grünwald Tibor* (1912–1992), *Jordan Károly* (1871–1959), Kalmár László, *Kárteszi Ferenc* (1907–1989), *Klein Eszter* (1910–2005), *Klug Lipót* (1854–1944), *Korányi Szevér* (1895–1955), *Kresznerics Károly* (?–?), *Márkus József* (?–?), *Sárközy Pál* (1884–1957), *Sós Ernő* (1881–?), *Spitz Iván* (?–?), *Szépréthy Béla* (1861–?), *Szűcs Adolf* (1884–1945), *Svédné Wachsberger Márta* (1910–2005), *Telkes Sándor* (1874–1951), *Tibanyi Miklós* (1873–1951), *Torda Klára* (?–?), *Tóvárosi Fischer György* (?–?), *Török Elemér* (?–?), *Turán Pál* (1910–1976), *Veress Pál* (1893–1945), *Weiszfeld Endre* (1916–2003).

„Fizikai, illetve csillagászati értekezést” írt többek között Bodócs István, *Bohárcsik Pál* (1899–1969), Csada Imre, Mende Jenő, *Nagy Béla* (1881–1954), *Selényi Pál* (1884–1954), *Strasser V. Benő* (1884–1966), *Szabó Gábor* (1876–1956), *Terkán Lajos* (1877–1940), *Vermes Miklós* (1905–1990), *Zilczér Pál* (?–?).

Érdeemes azt is megvizsgálni, hogy kik tűzték ki a feladatokat. Faragó Andor nem minden feladat alá írta oda az illető nevét, ezeket a feladatokat valószínűleg

különböző példatárakban találta, vagy ő maga találta ki őket – saját nevét egyetlen feladathoz se írta oda.

Matematikából nagyon sok feladatkitűző volt. Középiszkolások, egyetemi hallgatók, középiskolai és egyetemi tanárok. A legtöbb feladatot kitűzők nevei között találjuk Arany Dánielt, Bakos Tibort, Klug Lipótot, *König Dénest* (1884–1944), Kürschák Józsefet, továbbá Goldziher Károlyt a műegyetemről, *Hantos Lászlót* (?–?) a székesfehérvári, *Kántor Nándort* (1879–1939) az egri, Telkes Sándort a debreceni főreálból, *Kálovics Rezsőt* (1890–1942) és Sárközy Pál pannonhalmi bencés, Korányi Szevér kőszegi bencés, Balyi Ferenc Károly és *Bertram Brúnó* (1881–?) gödöllői premontrei, Bohárcsik Pál debreceni piarista tanárokat. Ott találjuk Kárteszi Ferencet és Spitz Ivánt, akik már bölcsészhallgatóként és Turán Pált, aki még a Madách gimnázium tanulójaként kezdett saját feladatokat küldeni Faragó Andornak. A legfiatalabb példakitűzők mind budapestiek voltak: *Alpár László* (1914–1991) az izraelita reálgimnáziumból, Erdős Pál a Szent István reálgimnáziumból és Hajós György a piarista gimnáziumból.

Fizikából a legtöbb feladatot Strasser V. Benő, az izraelita gimnázium tanára és Nagy Béla, a Szent László gimnázium tanára tűzte ki. Viszonylag sok feladatot küldött be még Korányi Szevér, Mende Jenő és Selényi Pál, néhányat Balyi Ferenc Károly, *Benkő Béla* (1893–1984), Bodócs István, *Bródy Imre* (1891–1944), Kántor Nándor, *Molnár Tibor* (?–?), Szabó Gábor, *Tóth Lajos* (1902–1990) és *Weltner Gyula* (1888–1945), de *Szekeres György* (1911–2005) és Turán Pál is adott feladatot fizikából.

Természetesen Faragó Andor és Nagy L. József is tűzött ki fizikafeladatokat. Néhány, a fentiek által kitűzött feladatot újra kitűzött a KöMaL fizikai szerkesztősége az utóbbi években, ezzel állítva emléket a Lapok egykori főszerkesztőjének és munkatársainak. Erdős Lajos nem tűzött ki feladatokat, ezt az élvezetet meghagyta fiának. Viszont tartalmas recenziókat közölt megjelent könyvekről, így Strasser V. Benő kétkötetes fizika tankönyvéről is. Ez nem hivatalos tankönyv, éppen csak egy érdekes, jó tankönyv volt, amelyet bárki megvásárolhatott a könyvesboltokban. *Simonyi Károly* (1916–2001) is megvette középiszkolás korában, és később büszkén emlegette, hogy ebből olvasott, hallott először *Einstein* relativitáselméletéről.

Végigtekintve a fenti névsorokon, óhatatlanul felmerül, milyen sokan ismerhették életében Faragó Andort. Azonban akárcsak Erdős Lajos vagy Nagy L. József, ő se szívesen állt a fényképezőgép kamerája elé. Erdős Lajosról szerencsére maradt egy családi fotó, Nagy L. Józsefről pedig nemrég került elő egy fénykép – talán még Faragó Andorról is előkerül egy? Igazán megérdemelné, hiszen ő közölte először a *Matematikai és Fizikai Lapokban* a legjobb megoldók fényképeit, s a sors fintora, hogy éppen róla nem maradt fenn fénykép, még egy tablókép sem.

A Faragó-lapok utolsó számai az 1938–39-es tanévben jelentek meg. Faragó Andor pedig – két fiával együtt – a holokauszt áldozata lett 1944-ben.

# SUGÁRNYALÁBOK INGADOZÁSAI ÉS KORRELÁCIÓJA A RÉSZECSEKÉP ALAPJÁN

Györgyi Géza (1930–1973)

## Bevezetés

Az utóbbi években számottevő érdeklődés fordult a koherens nyalábokban kimutatott fotonok korrelációjának problémája felé. Hazánkban *Jánossy Lajos* és munkatársai [1] végeztek koincidenca-, továbbá interferencia-kísérleteket, a fény természetének részecske- és hullámtulajdonságainak beható vizsgálatára törekedve. *E. Brannen* és *H. J. S. Ferguson* [2] ugyancsak a fundamentális kérdések iránti érdeklődéstől sarkallva végeztek később koincidenca-kísérleteket koherens fénynyalábokkal. *R. Hanbury Brown* és *R. Q. Twiss* [3] pedig gyakorlati csillagászati probléma: a csillagok szögátmérőjének interferometrikus meghatározása kapcsán vizsgálták fotonok korrelációját koherens nyalábokban.

2014. október 1-jén egykori lakóházánál (Budapest, II. Szilágyi Erzsébet fasor 79.) emléktáblát avattak *Györgyi Géza* tiszteletére, aki egyebek között a *Fizikai Szemle* Szerkesztőbizottságának is aktív tagja volt. Idézzük fel emlékéit egy 53 éve megjelent – *Fiz. Szemle* 12 (1962) 146–152. –, aktualitását azóta sem veszített írásával.



Ezekben a kísérletekben szűk, közel monokromatikus sugárnyalábot ( $s$ ) ejtettek egy  $T$  féligáteresztő tükörrre, amelyen a nyaláb részben visszaverődött, részben áthaladt. Az így előállított  $s_1$ ,  $s_2$  koherens fénynyalábok az  $F_1$ , illetve az  $F_2$  felfogóberendezésekre estek. Az  $F_1$ -hez és  $F_2$ -höz csatlakozó  $K$  berendezés rendeltetése az volt, hogy megállapítsa az  $F_1$  és az  $F_2$  fotoelektron-sokszorozó által adott időköz folyamán kimutatott fotonok számának korrelációját (1. ábra). A korrelációt koincidenca-kísérletek segítségével lehetett vizsgálni. A  $K$  koincidenca-számláló jelzése alapján megállapítható volt, ha egy-egy foton  $F_1$ -et és  $F_2$ -t adott  $\tau_f$  (= felbontási idő) hosszúságú időközön belül szólaltatta meg.

A koherens résznyalábokban észlelt fotonok korrelációjának megállapítására végzett, fent említett kísérletek eredményeit a következőkben foglalhatjuk össze. Mindaddig, míg a  $\tau_f$  felbontási idő nagy a vizsgált nyaláb  $\Delta\nu$  frekvenciaszélességének reciprokához, a  $\tau = 1/\Delta\nu$  mennyiségéhez viszonyítva:

$$\frac{\tau_f}{\tau} \gg 1, \quad (1)$$

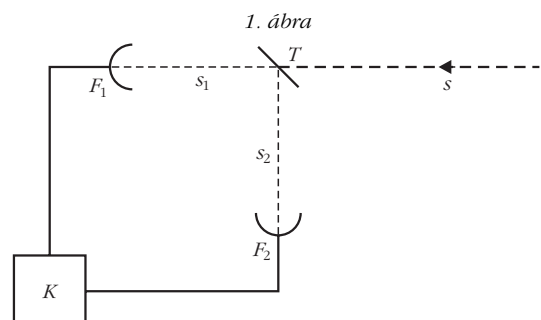
az  $F_1$  és  $F_2$  fotoelektron-sokszorozók által jelzett fotonok között nem tapasztalhatók szisztematikus koincidenca-kísérletek; az  $F_1$  és  $F_2$  által kimutatott fotonok között nem tapasztalnak korrelációt [1, 2]. Ha azonban a  $\tau_f$  felbontási idő a  $\tau$  reciprok vonalszélesség nagyságrendjébe esik:

$$\tau_f \approx \tau, \quad (2)$$

szisztematikus koincidenca-kísérletek észlelhetők; az  $F_1$  és  $F_2$  által kimutatott fotonok (intenzitások) ingadozásai között pozitív korreláció lép fel [3]. Ezt a korrelációt első ízben *R. Hanbury Brown* és *R. Q. Twiss* figyelték meg.

Megfelelnek-e ezek a kísérleti eredmények az elmélet várakozásainak? Miképpen magyarázhatók a (2) esetben megfigyelt szisztematikus koincidenca-kísérletek?

A korreláció eltűnése, amelyet az időrendben korábban az (1) feltétel mellett elvégzett kísérletekben



figyeltek meg, legegyszerűbben a fény leegyszerűsített részecskemodellje alapján, a klasszikus részecské-kép keretei között értelmezhető. Ha ugyanis a fény-nyalábot mint klasszikus tömegpontokhoz hasonlatos részecskék áramát gondoljuk el (amint azt például annak idején *Newton* tette), úgy természetes a felte-vés, hogy a nyalábban haladó fényrészecskék statisztikailag függetlenek. Egy ilyen nyalábból féligáteresz-tő tükrök segítségével előállított résznyalábok nyilvánvalóan függetlenek lesznek. Eszerint tehát a résznyalábokhoz tartozó részecskeszámok ingadozásainak korrelációja el kell hogy tűnjék.

Az előzőekben alapul vett klasszikus részecské-kép természetesen szélsőségesen leegyszerűsített képe a fénynek. Ismeretes például, hogy a hőmérsékleti sugárzás spektrumára a klasszikus részecské-kép kere-tei között levezetett Wien-féle törvény kis rezgésszámok és nagy hőmérsékletek ( $h\nu/kT \ll 1$ ) mellett egy-általán nem egyezik a megfigyelésekkel, illetve a megfigyeléseket helyesen leíró Planck-féle törvény-nyel. Ugyanígy a klasszikus részecské-kép korláto-zottságát mutatja a (2) feltétel mellett megfigyelt pozitív korreláció.

Módosulnak a következtetések, ha a fénynyaláb viselkedését a klasszikus hullámkép keretei között vizsgáljuk. Itt a nyalábot nyilván az egyes atomi fénykibocsátási aktusokban keletkezett csillapított hullám-vonulatokból állónak kell elgondolnunk. Míg e hullámvonulatok nem fedik egymást, a statisztikus függetlenség feltevése ezekre nézve is fenntartható. Az ilyen hullámvonulatok (amelyek egy-egy foton meg-személyesítőinek tekinthetők) által  $F_1$ -en, illetve  $F_2$ -n okozott beütések között nincs korreláció. – Más azon-ban a helyzet, ha a nyalábban haladó két hullámvonu-lat átfedi egymást, interferál. Ilyenkor az interferencia miatt az  $F_1$ -en és  $F_2$ -n kiváltott fotoelektronok nem tekinthetők statisztikusan függetleneknek, a beütés-számok ingadozásai között korreláció lép fel. – R. H Hanbury Brown és R. Q. Twiss ténylegesen a fény klasszikus hullámelmélete alapján vonták le a követ-keztetésüket, amely szerint a koherens résznyalábok intenzitásingadozásai között korrelációnak kell len-nie. Ez az elméleti következtetés ösztönözte őket kí-sérletük elvégzésére, amelyben első ízben sikerült megfigyelniük a korrelációt. Ezt követően megélén-kült az érdeklődés a fénynyalábok ingadozásainak és korrelációjának elmélete iránt. Igen részletes tárgyalá-sát adta a jelenségeknek a fény klasszikus elektro-mágneses hullámelmélete alapján több dolgozatában *Jánosy Lajos* [4]. Más szerzők is legnagyobbbrészt a klasszikus hullámkép keretei között vizsgálták a problémát. Ugyanakkor több hullámelméleti dolgo-zatban, így például *E. M. Purcell* munkájában [5] olvashatunk megjegyzéseket és megállapításokat, ame-lyekből kitűnik: tévedés volna azt gondolni, mintha a fény részecské-képe alapján nem volna megérthető a (2) esetben megfigyelt korreláció.

Ez nem meglepő. Ismeretes például, hogy a hőmér-sékleti sugárzás Planck-féle törvénye is levezethető nemcsak a hullámkép alapján (egy tükröző falú üveg

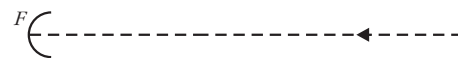
elektromágneses sajátrezgéseit szemügyre véve), de a részecské-kép alapján is (kiindulva a fotongáz statisztikai tárgyalásából). Ez a részecské-kép természetesen nem azonos a klasszikus részecské-képpel (amely, mint említettük, a Planck-törvény helyett a Wien-tör-vényhez vezet). Ahhoz, hogy a részecské-kép a (klas-zsikus modellel nem szemléltethető) kvantált elektro-mágneses sugárzási tér viselkedését hűen ábrázolja, tekintetbe kell vennünk egy nemklasszikus vonást: a részecskék azonosságát.<sup>1</sup>

Cikkünk célja, hogy bemutassa a fénynyalábok ingadozásainak és korrelációjának tárgyalását a ré-szecskekép keretei között, figyelembe véve a részecs-kék azonosságát.

## Sugárnyaláb ábrázolása a fázissíkon.

### Elemi fáziscellák

A koherens résznyalábok között fellépő korreláció tárgyalásának előkészítése céljából vizsgáljuk meg előbb egyetlen fénynyaláb ingadozásait, statisztikus viselkedését. Az intenzitás (a fotonok beütésszáma) és vele együtt az ingadozások jelzésére szolgáljon az  $F$  felfogóberendezés (2. ábra). Az egyszerűség ked-



2. ábra

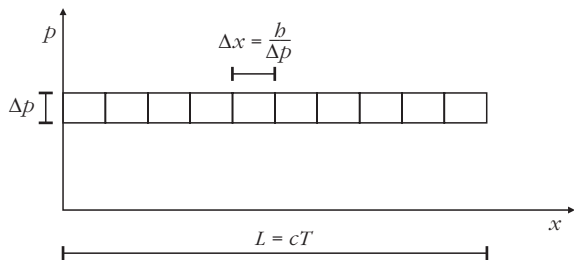
véért tegyük fel, hogy a nyalábban a  $(\nu_0 - \Delta\nu/2, \nu_0 + \Delta\nu/2)$  közbeeső frekvenciák egyenlő intenzitással vannak képviselve, e közön kívül pedig az intenzitás legyen zérus. Más szóval: feltesszük, hogy a nyaláb spektruma négyyszög alakú; a spektrum szélességét  $\Delta\nu$ , a frekvencia középértékét pedig  $\nu_0$  jelöli. Mint-hogy a foton  $p$  impulzusa a  $\nu$  rezgésszámmal a  $p = h\nu/c$  kapcsolatban áll,<sup>2</sup> ez azt jelenti, hogy a nyaláb fotonjainak impulzusértékei egy  $\Delta p = h\Delta\nu/c$  nagyságú közbé esnek.

Azok a fotonok, amelyek egy megadott  $T$  hosszú-ságú időköz folyamán esnek rá  $F$ -re, ezen időköz kezdetén egy  $L = cT$  hosszúságú szakasz mentén helyezkednek el. E fotonok helyzetét a koordinátára vonatkozó  $0 \leq x \leq L$  egyenlőtlenség zárja közre. A sokaság fotonjainak helyzetét ( $x$ ) és mozgá-sát ( $p$ ) jellemző pontok az  $(x, p)$  síkon, az úgyneve-zett fázissíkon eszerint  $L\Delta p$  területű négyszöget tölte-nek ki (3. ábra).

Részecskesokaságok statisztikus tárgyalásában alapvető a következő (sokszorosán beigazolódott) felte-vés: annak valószínűsége, hogy egy  $(x, p)$  fázispont a fázissík adott területű tartományába jusson, arányos e tartomány területével. Eszerint, ha a vizsgált fotonnyalábhhoz tartozó fázisnégyszöget egyenlő nagyságú cellákra osztjuk be (3. ábra), úgy egy fotont ábrázo-

<sup>1</sup> Megjegyezzük, hogy ugyanígy a hullámkép használata esetén is figyelembe veendő egy nem klasszikus vonás: a sugárzási tér saját rezgéseinek kvantáltsága.

<sup>2</sup> Itt a  $h$  a Planck-állandó,  $c$  a fénysebesség.



3. ábra

ló  $(x, p)$  fázispont egyenlő valószínűséggel kerülhet a cellák mindegyikébe.

A kvantumelmélet megadja a fázissík legfinomabb felosztásával adódó elemi cellák területét. Ha egy részecske állapotát (koordinátáját és impulzusát) a lehető legpontosabban határozzuk meg, a koordináta, illetve az impulzus határozatlanságát jellemző  $\Delta x$  és  $\Delta p$  mennyiségek szorzata a Planck-állandót kell hogy adja:  $\Delta x \cdot \Delta p = h$  (Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés). Ez az egyenlet határozza meg egy elemi fáziscella nagyságát: egy cella területe  $h$ -val egyenlő. Ennek alapján megállapíthatjuk: az  $L\Delta p$  területű fázisnégyzetben az elemi cellák száma

$$Z_p = \frac{L\Delta p}{h} = \frac{L\Delta v}{c}. \quad (3)$$

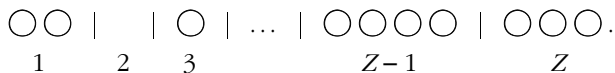
$Z_p$  a haladó mozgás szabadsági fokaihoz tartozó független fotonállapotok számát adja meg. Adott haladó mozgás esetén a foton polarizációja számára két különböző független állapot lehetséges. A független fotonállapotok teljes számát  $Z_p$  csak rögzített polarizáció (polarizált nyaláb) esetén adja meg. Ha mindkét polarizáció megengedett, az állapotok (cellák) teljes  $Z$  száma  $Z_p$  kétszerese:

$$Z = 2 \frac{L\Delta v}{c}. \quad (4)$$

## A fotonszám valószínűség-eloszlása egy elemi fáziscellában

A fénynyaláb ingadozásainak, statisztikus viselkedésének meghatározása érdekében foglalkozzunk most a következő feladattal: mi annak a valószínűsége, hogy egy kiszemelt fáziscellába pontosan  $n$  foton kerüljön?

Legyen a nyalábban haladó fotonok száma  $N$ . Hányféleképpen helyezhető el ez az  $N$  foton a  $Z$  számú cellában? Az esetek megszámlálását a fotonok azonosságának szem előtt tartásával kell elvégeznünk; két elrendezést, amelyek a fotonok felcserélésében különböznek, azonosnak kell tekintenünk. A megszámlálás így történhet [6]. A fotonokat ábrázolják körök. Először írjunk le annyi kört, ahány foton az első cellába jut, majd húzzunk egy vonalat; ezután írjuk le a második cellába került köröket, és ismét húzzunk egy vonalat és így tovább, végül a  $Z-1$ -edik vonal után írjuk le az utolsó ( $Z$ -edik) cellába jutó fotonoknak megfelelő köröket:



Az összes lehetséges elhelyezés számát úgy kapjuk meg, hogy az  $N$  foton (kör) és a  $Z-1$  vonal összes permutációinak  $(N+Z-1)!$  számát elosztjuk a  $N!$ -sal és  $(Z-1)!$ -sal, a fotonok, illetve a vonalak egymás közötti felcseréléseinek számával. A keresett szám tehát:

$$\frac{(N+Z-1)!}{N!(Z-1)!} = \binom{N+Z-1}{N}. \quad (5)$$

Ezen kívül meg kell határozni azon elhelyezkedések számát, amelyeknél a kiszemelt cellába pontosan  $n$  részecske jut. Ezen elhelyezkedések számát úgy kapjuk, hogy a fennmaradó  $N-n$  foton az összes lehetséges módon elhelyezzük a fennmaradó  $Z-1$  cellába. Az elhelyezkedések számát (5)-ből nyilván a  $N \rightarrow N-n$ ,  $Z \rightarrow Z-1$  helyettesítéssel kapjuk:

$$\binom{N+Z-n-2}{N-n}. \quad (6)$$

Annak valószínűségét kívánjuk tudni, hogy egy kiszemelt cellába pontosan  $n$  részecske jusson. E valószínűséget a „kedvező” esetek (6) s az összes esetek (5) számának hányadosa szolgáltatja:

$$\frac{\binom{N+Z-n-2}{N-n}}{\binom{N+Z-1}{N}}. \quad (7)$$

Itt feltehető, hogy  $N$  igen nagy szám, hiszen az ingadozásokra, korrelációra igen sok fotonnal elvégzett megfigyelésekből következtetnek. Elvégezhetjük tehát (7)-ben az  $N \rightarrow \infty$  határátmenetet, ugyanakkor szükséges  $Z \rightarrow \infty$  is, miután az egy cellára eső átlagos fotonszámot, a  $v = N/Z$ -t (az intenzitás spektrális sűrűségét) a kísérleti feltételek meghatározzák. A (7)-es kifejezést célszerűen átalakítva és a mondott határátmenetet elvégezve kapjuk:

$$\begin{aligned} & \frac{(N+Z-n-2) \dots (Z-1)}{(N-n)!} = \\ & \frac{(N+Z-1) \dots Z}{N!} = \\ & = \frac{(Z-1)(N-n+1)(N-n+2) \dots N}{(N+Z-1)(N+Z-2) \dots (N+Z-n-1)} = \\ & = \left(1 - \frac{1}{Z}\right) \left(v - \frac{n-1}{Z}\right) \left(v - \frac{n-2}{Z}\right) \dots \left(v - \frac{1}{Z}\right) v \rightarrow \\ & = \frac{\left(1 - \frac{1}{Z}\right) \left(1 + v - \frac{1}{Z}\right) \left(1 + v - \frac{2}{Z}\right) \dots \left(1 + v - \frac{n+1}{Z}\right)}{\left(1 + v - \frac{1}{Z}\right) \left(1 + v - \frac{2}{Z}\right) \dots \left(1 + v - \frac{n+1}{Z}\right)} \rightarrow \\ & \rightarrow v(n) = \frac{1}{1+v} \left(\frac{v}{1+v}\right)^n, \quad (8) \end{aligned}$$

ha  $N = vZ \rightarrow \infty$  ( $v = \text{const.}$ ). A kapott  $v(n)$  kifejezés





$N, Z \gg 1$  és rögzített  $v = N/Z$  esetén közelítőleg megadja annak valószínűségét, hogy egy kiszemelt fáziscellában pontosan  $n$  foton legyen jelen.<sup>3</sup>

## A valószínűség-eloszlás több elemi cellából álló fázistartományban

Ahhoz, hogy a fénynyaláb ingadozásai val. kapcsolatban feltett kérdésekre válaszolhassunk, ismernünk kell annak  $v_z(n)$  valószínűségét, hogy a fázissík egy tartományába, amely  $z$  elemi cella egyesítése útján állt elő, pontosan  $n$  foton essék. A keresett valószínűség (8)-ból a

$$v_z(n) = \sum_{k_1+k_2+\dots+k_z=n} v(k_1) v(k_2) \dots v(k_z) \quad (9)$$

képlet szerint kapható. A (8) kifejezést (9)-be helyettesítve kapjuk:

$$v_z(n) = \left( \frac{1}{1+v} \right)^z \sum_{k_1+k_2+\dots+k_z=n} \left( \frac{v}{1+v} \right)^{k_1+k_2+\dots+k_z}$$

Az itt álló  $z$ -szeres összeg minden tagja ugyanakkora:

$$\left( \frac{v}{1+v} \right)^n \text{-nel}$$

egyenlő. A tagok száma pedig annyi, ahányféleképpen  $n$ -et  $z$  számú nemnegatív egész szám összegeként előállíthatjuk. E lehetőségek száma  $n$  elem  $z-1$ -edrendű ismétléses kombinációi számával,

$$\binom{n+z-1}{z-1} \text{-gyel}$$

egyenlő. Írható tehát:

$$v_z(n) = \binom{n+z-1}{z-1} \left( \frac{1}{1+v} \right)^z \left( \frac{v}{1+v} \right)^n \quad (10)$$

Ez tehát annak valószínűsége, hogy a fázissík egy  $z$  elemi cella egyesítése útján kapott tartományában pontosan  $n$  foton legyen jelen. A (10) valószínűség ismeretében már következtethetünk a fotonnyaláb statisztikus viselkedésére. Következtetéseink levonásához azonban meg kell még határozni a kapott valószínűség-eloszlás várható értékét és szórását; szükségünk lesz továbbá a  $v_z(n)$  valószínűség  $z \rightarrow \infty$  ( $zv = \text{const.}$ ) határátmenettel adódó alakjára. Ha az olvasó a (14) és (15) végképleteket igazolás nélkül elfogadja, az apró betűs szakaszban közölt számításokat átugorhatja.

### Várható érték, szórás és a határátmenet

A  $z$  elemi cellát magában foglaló fázistartományban a fotonszám várható értékét az

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} n v_z(n)$$

<sup>3</sup> A (7)-ből (8)-hoz vezető határátmenet analóg a binomiális eloszlástól a Poisson-eloszláshoz vezető határátmenettel [6].

képlet szolgáltatja. Helyettesítsük be ide (10)-et, és alkalmazzuk az  $\alpha = v/(1+v)$  jelölést:

$$\begin{aligned} \bar{n} &= (1-\alpha)^z \sum_{n=0}^{\infty} n \binom{n+z-1}{z-1} \alpha^n = \\ &= \frac{(1-\alpha)^z}{(z-1)!} \sum_{n=0}^{\infty} (n+z-1)(n+z-2)\dots(n+1) n \alpha^n = \\ &= \frac{(1-\alpha)^z}{(z-1)!} \alpha \sum_{m=z-1}^{\infty} m(m-1)(m-2)\dots(m-z+1) \alpha^{m-z} = \\ &= \frac{(1-\alpha)^z}{(z-1)!} \alpha \left( \frac{d}{d\alpha} \right)^z \sum_{m=0}^{\infty} \alpha^m = \\ &= \frac{(1-\alpha)^z}{(z-1)!} \alpha \left( \frac{d}{d\alpha} \right)^z \frac{1}{1-\alpha} = \\ &= \frac{z!}{(z-1)!} \alpha \frac{(1-\alpha)^z}{(1-\alpha)^{z+1}} = \\ &= z \frac{\alpha}{1-\alpha}. \end{aligned} \quad (11)$$

Itt felhasználtuk a mértani sor összegképletét:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \alpha^m = \frac{1}{1-\alpha}.$$

Beírva (11)-be az  $\alpha = v/(1+v)$  jelölést, kapjuk:

$$\bar{n} = zv. \quad (12)$$

A  $(\overline{\Delta n})^2$  szórásnégyzetet a

$$(\overline{\Delta n})^2 = \overline{(n-\bar{n})^2} = \overline{n^2} - \bar{n}^2 = \overline{n(n-1)} - \bar{n}(\bar{n}-1) \quad (13)$$

képlet definiálja. Az  $\overline{n(n-1)}$  várható értéket a (11) mintára elvégzett átalakítások segítségével kapjuk.

$$\begin{aligned} \overline{n(n-1)} &= (1-\alpha)^z \sum_{n=0}^{\infty} n(n-1) \binom{n+z-1}{z-1} \alpha^n = \\ &= \frac{(1-\alpha)^z}{(z-1)!} \alpha^2 \left( \frac{d}{d\alpha} \right)^{z+1} \frac{1}{1-\alpha} = (z+1) z v^2. \end{aligned}$$

Ezt az eredményt és (12)-t felhasználva, (13)-ból a szórásnégyzetre

$$(\overline{\Delta n})^2 = \bar{n} \left( 1 + \frac{\bar{n}}{z} \right) \quad (14)$$

adódik.

Érdekes végül megvizsgálni, mi a határértéke a (10) valószínűségnek nagyon sok elemi cellát tartalmazó fázistartomány vagyis  $z \rightarrow \infty$  esetén, ha eközben az  $\bar{n} = zv$  várható értéket rögzítjük. Átalakítjuk (10)-et, alkalmazva a  $\mu = zv$  jelölést:

$$\begin{aligned} v_z(n) &= \frac{(n+z-1)(n+z-2)\dots(n+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (z-1)} \left( \frac{1}{1+v} \right)^z \left( \frac{v}{1+v} \right)^n = \\ &= \frac{\mu^n}{n!} \left( 1 + \frac{\mu}{z} \right)^{-z} \left( \frac{n-1}{z} + 1 \right) \left( \frac{n-2}{z} + 1 \right) \dots \left( \frac{1}{z} + 1 \right) \frac{1}{\left( 1 + \frac{\mu}{z} \right)^n}. \end{aligned}$$

Bármely rögzített  $n$ , valamint rögzített  $\mu$  mellett  $z \rightarrow \infty$  esetén  $(1 + \mu/z)^{-z} \rightarrow \exp(-\mu)$ , az utolsó tényezőként álló emeletes tört határértéke pedig 1. A határátmenet eredménye tehát:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} v_z(n) = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!}, \quad (15)$$

vagyis: (az átlagos fotonszámhoz képest) nagyon sok elemi cellát tartalmazó fázistartományban a fotonszám valószínűség-eloszlása Poisson-eloszlás.

## Következtetések

A levezetett eredmények birtokában megadhatjuk a választ a fényingadozással és korrelációval kapcsolatos felvetett kérdésekre.

Vegyünk először szemügyre egy nyalábot, mely essék egy felfogóberendezésre (2. ábra). A nyaláb  $l$  hosszúságú szakaszában foglalt fotonok a felfogóberendezést egy  $t = l/c$  hosszúságú időközben érik el. A nyaláb  $e$  szakaszához tartozó elemi fáziscellák száma (4) mintájára a  $z = 2l\Delta\nu/c$  alakban írható fel. Ha ide beírjuk  $l = ct$ -t és a  $\tau = 1/\Delta\nu$  reciprok frekvenciaszélességet, az elemi cellák számát a

$$z = 2 \frac{t}{\tau} \quad (16)$$

alakban kapjuk. Ezt (16)-ba helyettesítve a szórásnégyzetre

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{n} \frac{\tau}{t} \right) \quad (17)$$

adódik. Ez a képlet jellemzi az  $F$  által egy  $t$  időközben kimutatott fotonszám ingadozásait. A következőkben megmutatjuk, hogy ezek az ingadozások a koherens résznyalábok között korrelációt eredményeznek.

Fordítsuk most figyelmünket a féligáteresztő tükörrel nyert résznyalábok korrelációjának vizsgálatát célzó kísérlet felé (1. ábra). Tegyük fel, hogy adott  $t$  idő alatt az  $F_1$  felfogóberendezés  $n_1$ ,  $F_2$  pedig  $n_2$  foton beérkezését mutatja. (Az egyszerűség kedvéért  $F_1$ -nek,  $F_2$ -nek és  $F$ -nek egységnyi megszólalási valószínűséget tulajdonítunk.) Alkalmazzuk (17)-et  $n_1$ -re és  $n_2$ -re:

$$\overline{(\Delta n_1)^2} = \bar{n}_1 \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{n}_1 \frac{\tau}{t} \right), \quad (18)$$

$$\overline{(\Delta n_2)^2} = \bar{n}_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{n}_2 \frac{\tau}{t} \right).$$

$F_1$  és  $F_2$  együtt (képzeletben egyetlen  $F$  berendezéssé egyesítve)  $t$  idő alatt összesen  $n = n_1 + n_2$  foton jelez. Ha az  $n = n_1 + n_2$ -t (17)-be helyettesítjük, és felhasználjuk (18)-at, kapjuk:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta n_1 \Delta n_2} &\equiv \overline{(n_1 - \bar{n}_1)(n_2 - \bar{n}_2)} = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \overline{(\Delta n)^2} - \overline{(\Delta n_1)^2} - \overline{(\Delta n_2)^2} \right] = \\ &= \frac{\bar{n}_1 \bar{n}_2 \tau}{2t}, \end{aligned} \quad (19)$$

vagyis: a koherens résznyalábokban kimutatott fotonszámok között pozitív korreláció észlelhető. Ez a képlet fejezi ki a *Bevezetésben* leírt Brown–Twiss-effektust. Egy koincidenciakísérletben a pozitív korreláció a koincidenciák számának növekedését eredmé-

nyezi: a véletlen koincidenciák mellett szisztematikus koincidenciák jelentkeznek.

Határozzuk meg a koincidenciák számát. Legyen a koincidenciaszámláló felbontási ideje  $\tau_f$ . Ha  $F_1$  valamely adott  $t_0$  pillanatban jelez egy foton, úgy ezzel az  $n_2$  foton van koincidenciában, amely  $F_2$ -t a  $t_0 - \tau_f$ ,  $t_0 + \tau_f$  időközben éri el. Ha  $F_1$ -re  $2\tau_f$  idő alatt  $n_1$  foton érkezik, úgy  $2\tau_f$  hosszúságú időközre  $n_1 n_2$  ko incidencia esik. Itt feltesszük, hogy  $n_1$  és  $n_2$  az egynél nagyobb értékeket elenyésző valószínűséggel veszi fel, más szóval

$$\bar{n}_1, \bar{n}_2 \ll 1. \quad (20)$$

Valamely  $T (\gg 2\tau_f)$  idő alatt a koincidenciák számának várható értéke eszerint

$$k = \frac{T}{2\tau_f} \bar{n}_1 \bar{n}_2.$$

A  $t = 2\tau_f$  esetre alkalmazott (19) képlet segítségével kapjuk:

$$\begin{aligned} k &= \frac{T}{2\tau_f} \left( \bar{n}_1 \bar{n}_2 + \overline{\Delta n_1 \Delta n_2} \right) = \\ &= \frac{T}{2\tau_f} \bar{n}_1 \bar{n}_2 \left( 1 + \frac{\tau}{4\tau_f} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Leolvashatjuk: az eltűnő korreláció ( $\overline{\Delta n_1 \Delta n_2} = 0$ ) esetében adódó  $k_r = (T/2\tau_f) \bar{n}_1 \bar{n}_2$  számú ko incidenciához, a véletlen ko incidenciákhoz a (19) pozitív korreláció folyamánaképpen  $k_s = (\tau/4\tau_f) k_r$  számú szisztematikus ko incidencia járul. A kétféle ko incidencia számának  $\kappa = k_s/k_r$  viszonyára (19) alapján írható:

$$\kappa = \frac{\overline{\Delta n_1 \Delta n_2}}{\bar{n}_1 \bar{n}_2} = \frac{\tau}{4\tau_f}. \quad (22)$$

Ezzel a képlettel a *Bevezetésben* idézett, az (1) és a (2) feltétel mellett elvégzett kísérletek eredményei láthatóan összhangban vannak.

Könnyen felismerhetjük az (1), (2) feltételek szemléletes jelentését. A (16) képlet mutatja, hogy a nyaláb  $t$  idő alatt beérkező szakaszához  $z = 2t/\tau$  számú elemi cella tartozik. A szisztematikus ko incidenciák relatív számát megadó (22) alatti  $\kappa$  mennyiség eszerint a  $2\tau_f$  kétszeres felbontási időnek megfelelő cellaszám reciproka. Ahhoz, hogy  $\kappa \geq 1$  legyen, a ko incidenciaszámlálónak legalábbis egy elemi cellát fel kell oldania!

Megfontolásaink és számításaink alapján egy fotonnyaláb statisztikus viselkedését, ingadozásait a következőképpen jellemezhetjük. Míg az egy cellára eső átlagos fotonszám kicsi:  $\bar{n}/z \ll 1$ , úgy a fotonszámra jó közelítésben a (15) Poisson-eloszlás érvényes. Ilyenkor (14) szerint a fotonszám ingadozásait kifejező szórásnégyzet a független eseményekre jellemző ( $\overline{(\Delta n^2)} = \bar{n}$ ) alakot ölti, és a koherens résznyalábokban kimutatott  $n_1$ ,  $n_2$  részecskeszámok ( $n_1 + n_2 = n$ ) korrelációja eltűnik:

$$\overline{\Delta n_1 \Delta n_2} = \frac{(\overline{\Delta n})^2 - \overline{(\Delta n_1)^2} - \overline{(\Delta n_2)^2}}{2} =$$

$$= \frac{\bar{n} - \bar{n}_1 - \bar{n}_2}{2} = 0,$$

szisztematikus koincidenciák nem jelentkeznek. A fotonok ilyenkor független részecskék módjára viselkednek, és amint arra a *Bevezetésben* is rámutattunk, alkalmazható a klasszikus részecskékép.

Általában azonban (ha tudniillik az  $\bar{n}/z \ll 1$  feltétel nem teljesül) a fotonok nem tekinthetők független részecskéknek. A fotonszámra a részecskék azonossága figyelembevételével kapott, a Poisson-eloszlástól eltérő (10) valószínűség-eloszlás érvényes, a szórásnégyzet a „normális”  $\bar{n}$  értéknél  $(1 + \bar{n}/z)$ -szer nagyobb. E „hipernormális” szórás következménye a résznyalábokba kimutatott fotonszámok pozitív korrelációja. – A szórásnégyzet  $\bar{n}$  tagjának megfelelő ingadozásokat (utalva az izzókatódók elektronemissziójánál fellépő analóg ingadozásokra) sörétzajnak, az ehhez járuló  $\bar{n}^2/z$  tagot pedig interferencia-zajnak nevezhetjük. Megjegyezzük, hogy *Vavilov* fényingadozás-kísérleteiben [7] a sörétzajt figyelték meg.

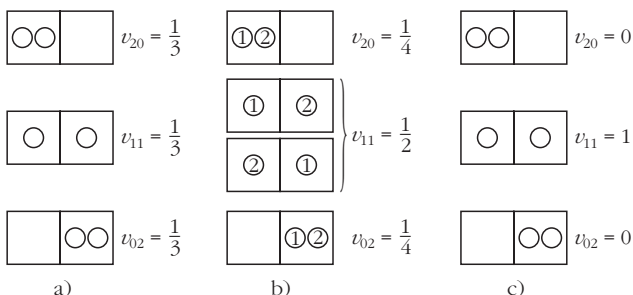
Az, hogy a  $v_z(n)$  eloszlás és a hozzátartozó,

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} + \frac{\bar{n}^2}{z}$$

szórásnégyzet alakja függ  $z$ -től, vagyis attól, hogy a nyaláb szemügyre vett szakaszához tartozó fázisstartomány hány  $b$  nagyságú elemi cellát tartalmaz, mutatja, hogy a vizsgált ingadozási és korrelációs jelenségeket – a részecskékép keretei között szemlélve – jellegzetesen kvantumos effektusnak kell tekintenünk.

Milyen szemléletes kép kapcsolható a fotonok „hipernormális” ingadozásaihoz? Könnyű belátni, hogy azonos részecskék esetében nagyobb annak a valószínűsége, hogy két (vagy több) részecske ugyanazon elemi cellába kerüljön, mint megkülönböztethető klasszikus részecskék esetén (példaként lásd a

4. ábra. a) Fotonok különböző lehetséges elhelyezkedései két kvantumcellában, a részecskék azonosságának figyelembevételével. b) Klasszikus (megkülönböztethető) részecskék lehetséges elhelyezkedései két kvantumcellában. Az a) és b) ábrákat összevetve látjuk: annak valószínűsége ( $v_{20}$ , illetve  $v_{02}$ ), hogy két részecske ugyanabba a cellába kerüljön, azonos részecskékre nagyobb, mint a klasszikus esetben. c) Elektronok esetében a részecskék azonossága mellett érvényesül a Pauli-féle kizárási elv is. Így annak valószínűsége, hogy egy cellába egynél több részecske kerüljön, eltűnik:  $v_{20} = v_{02} = 0$ .



4.a, b ábrát). A részecskék azonossága kedvez annak, hogy egy elemi cellában több foton tömörüljön: a fotonok „kedvelik” egymás társaságát. Ez a tömörülési tendencia eredményezi a hipernormális ingadozásokat.

Jobban bepillanthatunk a jelenség fizikai hátterébe, ha tekintetbe vesszük a részecskék (fotonok) hullámtermészetét: az elemi fáziscella fogalma így mélyebb szemléletes tartalmat nyer. Egy elemi cella kiterjedése a koordinátatengely mentén  $\Delta x = b/\Delta p = c/\Delta \nu = c\tau$ . A  $\tau$  reciprok vonalszélesség a fotont kibocsátó atom átlagos élettartamát, vagyis a sugárzás időtartamát jellemzi. Ennek megfelelően  $\Delta x = c\tau$  a kibocsátott hullámvonulat hosszára jellemző. A sugárnyaláb  $l$  hosszúságú szakaszához tartozó  $l\Delta p$  fázisstartomány eszerint annyi  $\Delta x\Delta p = b$  nagyságú elemi cellát tartalmaz, ahány (adott polarizációjú) hullámvonulat az  $l$  szakaszon számottevő átfedés nélkül elhelyezhető. A most felismert „cellák száma = átfedés nélkül elhelyezhető hullámvonulatok száma” kapcsolat alapján megállapíthatjuk:

Az  $\bar{n}/z \ll 1$  esetben a fotonokhoz rendelt hullámvonulatok ritkásan érkeznek, közöttük nincs számottevő átfedés. A *Bevezetésben* megállapítottuk, hogy ilyenkor a nyaláb független részecskék nyalábjaként viselkedik. Ezzel összhangban van az  $\bar{n}/z \ll 1$  határesetben talált (15) eredmény, amely szerint a fotonszámra a Poisson-eloszlás érvényes, a szórás normális, a korreláció pedig eltűnik.

Az  $\bar{n}/z \geq 1$  esetben, midőn egy cellába számottevő valószínűséggel kerülhet egynél több foton is, a hullámvonulatok jelentékeny mértékben átfedik egymást és interferencia jön létre. Ilyenkor tér el a fotonszám-eloszlás a Poisson-eloszlástól, a szórás hipernormálisá válik, és ennek folyományaképpen fellép a pozitív korreláció. Levonhatjuk ebből a következtetést: a hipernormális ingadozásokat (az interferencia-zajt) valóban az interferencia, a hullámvonulatok átfedése eredményezi.

## Függelék

Ha fotonok helyett elektronok statisztikus viselkedését vizsgáljuk, a részecskék azonosságán kívül figyelembe kell vennünk a Pauli-elvet, amely szerint egy elemi cellát legfeljebb egy részecske foglalhat el. Ekkor a részecskeszám valószínűség-eloszlására (10) helyett

$$v_z(n) = \binom{z}{n} (1-v)^{z-n} v^n, \quad (0 \leq n \leq z)$$

adódik, a szórásnégyzet pedig

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} \left(1 - \frac{\bar{n}}{z}\right). \quad (*)$$

Ha  $z v = \bar{n} = \text{const.}$  mellett elvégeztük a  $z \rightarrow \infty$  határátmenetet, most is megkapjuk a Poisson-eloszlást.

Mint (\*) mutatja, most a  $\overline{(\Delta n)^2}$  szórás kisebb, mint a „normális”  $n$  érték; ennek folyományaképpen koherens résznyalábokban kimutatott elektronok között negatív korreláció lép fel.

A magyarázat kézenfekvő. Látuk, hogy a fotonok „szívesen” tömörülnek össze többen egy elemi cellában: ez vezetett a hipernormális ingadozásokhoz. Az elektronok esetében a Pauli-elv éppen az ilyen tömörülést tiltja meg (4.c ábra). Ha a fotonokat „társaságkedvelők”-nek nevezték, az elektronokra a „magánykedvelők”

jelző illik. Természetüknek ez a vonása magyarázza, hogy ingadozásai a normális érték alatt maradnak, és ha az *1. ábra* ko incidenciakísérletét elektronokkal végeznénk el, a (2) feltétel teljesülése mellett a függetlenség feltevése alapján várható (véletlen) ko incidenciaszámnál is kevesebb ko incidenciát kapnánk.

#### Irodalom

1. A. Ádám, L. Jánossy, P. Varga, *Acta Phys. Hung.* 4 (1955) 301; lásd még: Jánossy L., Náray Zs., *Fiz. Szemle* 8 (1958) 3.

2. E. Brannen, H. I. S. Fergusson, *Nature* 178 (1956) 481.
3. R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, *Nature* 177 (1956) 27; R. Q. Twiss, A. G. Little, R. Hanbury Brown, *Nature* 180 (1957) 324.
4. L. Jánossy, *Il Nuovo Cimento* 6 (1957) 111; 12 (1959) 369; G. Graff, L. Jánossy, *Acta Phys. Hung.* 10 (1959) 291.
5. E. M. Purcell, *Nature* 178 (1956) 1449.
6. Rényi A.: *Valószínűségszámítás*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1954.
7. S. I. Wawilow: *Die Mikrostruktur des Lichtes*. Akademie-Verlag, Berlin, 1954.

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# GYÖRGYI GÉZA EMLÉKTÁBLÁJÁNAK AVATÁSÁRA

Lévai Péter

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Györgyi Géza emléktáblájának 2014. október elseji avatásán (a képet lásd a 252. oldalon) számos pályatárs, tanítvány, barát, kolléga, szakmai és területi szervezet képviselője, valamint családtag vett részt. Emlékbeszédet mondott *Zawadowski Alfréd* professzor emeritus, az MTA tagja, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat leköszönő elnöke, a társulat és a barátok nevében, valamint *Lévai Péter*, az MTA levelező tagja, a Wigner Fizikai Kutatóközpont főigazgatója, Györgyi Géza munkahelye, a Központi Fizikai Kutatóintézet jogutódja képviseletében. Koszorút helyezt el az ELFT nevében *Zawadowski Alfréd* és *Kürti Jenő* főtítkárra, a Wigner FK nevében *Lévai Péter* és *Frenkel Andor*, a Bay Zoltán Alapítvány részéről *Nagy Ferenc* elnök és *Kádár György* főtítkárra, a II. kerületi önkormányzat nevében *Láng Zsolt* polgármestert képviseelve *Ötvös Zoltán* művelődési irodavezető, végezetül a család koszorúzott. Ezt követően egy közeli étteremben tartott fogadáson nagyszámú, kötetlen hangvételű megemlékezés tanúsította, hogy Györgyi Géza szellemi öröksége és emberi tartásának emléke elevenen él. Alább közöljük Lévai Péter beszédének szövegét.



Negyvenegy évvel ezelőtt búcsúzott el a magyar fizikus közösség egy tragikus hirtelenséggel eltávozott, már életében meghatározóvá vált tagjától, Györgyi Gézától. Újraolvasva a temetésen elhangzott búcsúbeszédet, a kollégák már akkor látták és megfogalmazták, hogy mekkora szellemi nagyság távozott el, milyen nagy a veszteség, mi minden valósulhatott volna még meg, ha nem ér véget ilyen hamar egy élet. Egy olyan élet, amely hosszasan időzött a szellemi magasságokban.

Most, 41 évvel később, Györgyi Géza emléktáblájánál állva, arról szeretnék beszélni, hogy az életében is nagy formátumú fizikus miként hatott az utókorra, mennyiben befolyásolta, mennyiben változtatta meg az utána érkezettek életét.

Kezdjük talán a legszelebb körrel, egyúttal a legnagyobb hatással. Itt konkrétan a *Fizikai Szemlére* gondolok, az ott megjelent cikkeire, tanulmányaira. Az előttem szóló *Zawadowski* professzor úr a pályatárs szemével emlékezett vissza. Én azokat képviselem, akik Györgyi Gézát személyesen nem ismerheték, de találkozhattak cikkeivel a *Fizikai Szemle* korábbi példányaiban, akár már középiskolás korukban, versenyekre készülve. A 70-es években még nem volt internet, a fiataloknak nem volt olyan egyszerű kielégíteni kíváncsiságukat, mint manapság – ezért is volt kulcsszerepe többek között a *Fizikai Szemlének*. Györgyi Géza cikkeit a kvantumvilág csodáiról, az atomokról, az erős kölcsönhatásról, a szimmetriákról, a megmaradási törvényekről ott olvashattuk magyarul, egyúttal közérthetően. Olyan csodálatos dolgokról tájékozódhattunk, ami lázba tudott hozni egy fiatal, ami mélyen elgondolkoztathatta, majd befolyásolhatta pályaválasztását, s végezetül akár a természettudományos oktatás vagy a kutatás felé is fordította. Biztos vagyok benne, hogy a jelenlévők között is több ilyen egykori fiatal (és idősebb) található, akiket Györgyi Géza cikkei ihlettek meg. Györgyi Géza a betegségével dacoló éve alatt a legújabb eredményeket hozta el az olvasóihoz, felbecsülhetetlen szolgálatot téve ezzel az egész magyar tudományos közösségnek.

A következő, némileg kisebb körbe a már elkötelezett, fizikusnak jelentkező egyetemi hallgatók tartoznak. Azok, akik magyar nyelvű könyvből, jegyzetből tanulhattak. Első éves egyetemistaként Györgyi Géza *Elméleti magfizika* könyvére a Múzeum körüti antikváriumban csaptam le. A jelenlévők közül sokan ismerik a magfizika rejtelmét, azt a nagyon széles fenomenologikus, kísérleti eredményekre támaszkodó megalapozást, ami egyrészt rejtélyessé és széppé, de egyúttal nehezen követhetővé, sokszor nehezen érthetővé teszi ezt a tudományágat. Ne add föl! Igenis működhet a globális alulnézet, a tudás elemi egysé-

geinek fáradhatatlan egymás mellé illesztése, majd összeolvasztása egy nagy egészé – ezt sugalmazta ez a könyv. Bevallom, ha a könyv segítségével nem megyek szép lassan végig ezen az úton, hanem csak a heti két óra egyetemi magfizikai oktatásban veszek részt, valószínűleg nem váltam volna magfizikussá és ma itt más képviselné magfizikával is foglalkozó kutatóközpontunkat ezen az emléktábla-avatáson. Egy jó tankönyv sokat jelent. Sok jó tankönyv egy egyetem, egy egész ország részvételét tudja biztosítani egy adott tudományterületen. Györgyi Géza könyvének, jegyzeteinek ilyen hatása volt.

A nagyon pontosan megírt, a hagyományokat, a történelmi lépéseket és azok meglépőit is bemutató könyvek és cikkek ahhoz is hozzásegítették a hallgatókat, hogy a nagy nevek mögött a tudás, a tett is megjelenjen és bevésődhessen, illetve fordítva. Nem véletlen, hogy a 70-es, 80-as években sok elméleti magfizikussá vált kolléga sikerrel telepedett le külföldön országban, s az itthon maradtak is szívesen látott vendégek voltak a külföldi kutatóintézetekben. Pontosság, precizitás, magas szintű képzettség. Györgyi Géza ennek az irányzatnak volt megtestesítője, az utána következő generáció ezt kaphatta tőle. Személyes élményként hadd meséljem el, hogy annak idején a Serber-erőket is Györgyi Géza könyvéből tanultam meg, és joggal lehettem büszke magfizikai képzésekre, amikor a Columbia Egyetemen az akkor elhunyt Serber professzor szobáját használhattam – és amikor szóba került a nagyhírű professzor, akkor hibátlanul soroltam eredményeiből néhányat, amin az idősebb helyi professzorok igencsak meglepődtek. Györgyi Géza művei a következő generáció számára közelebb hozták a nemzetközi nagyvilágot, a segítségével megszerzett tudásunkkal egyenrangúakká váltunk a nagyvilág magfizikusaival. Ez egy nagyon jó érzés, amihez Györgyi Géza nagyban hozzájárult. Milyen jó, hogy a széles körben elérhetővé vált egyetemi jegyzetei, *Fizikai Szemlében* megjelent cikkei létrejöttek és megjelentek a nagy szellemi koncentrációt igénylő, specialistáknak szóló szakcikkek mellett, mert így a következő generációnak volt miből tanulnia, építkeznie. Milyen szerencsések vagyunk, hogy megszülettek ezek az alkotások is.

„Óriások vállán állunk” – gyakran elhangzik ez a mondat visszaemlékezésekben, tudományos előadásokon. Györgyi Gézára visszaemlékezve ez még inkább igaz. A Csillebércen található egykori KFKI, majd RMKI, s mostani nevén Wigner Fizikai Kutatóközpont kapcsán jó helyen idézhetjük ezt a mondást. Nekünk azt a munkát kell folytatnunk, amelyet olyan elődök, mint Györgyi Géza kezdtek el és műveltek magas színvonalon. Ez nagy kihívás.

Itt érkeztem el egy újabb fontos területhez, amelyben sokat köszönhetünk Györgyi Gézának. Nevezetesen, hogy hagyománytiszteletétől hajtva összegyűjtötte, összerendezte és megjelentette olyan világhírűvé vált honfitársaink levelezését, mint *Wigner Jenő*, *Neumann János* és *Ortvay Rudolf*. Lefordította magyarra *Eisenbud*, *Garvey* és *Wigner Az atommag*

*szerkezete* című könyvét és *Wigner Jenő Szimmetriák és reflexiók* című tanulmánygyűjteményét. Intenzív levelezést folytatott külföldi kollégáival, és nagymértékben az ő érdeme, hogy olyan világhírű, magyar származású kutatók, mint *Wigner Jenő* és *Lánczos Kornél* eleven kapcsolatot találtak a hazai fizikustársadalommal. Elérte, hogy távolba szakadt honfitársaink ismét szerettek magyarok lenni, és örömmel látogattak haza, hozták családjukat, büszkén mutatták szülőházjukat. Ezt onnan tudom, hogy Óhióban 2000 körül volt szerencsém találkozni és beszélgetni *Martha Wignerrel*, aki nagy tisztelettel emlékezett vissza azokra a honfitársainkra, akik fogadták őket édesapja magyarországi látogatásain, ahová ő is elkísérte annak idején *Wigner Jenőt*. Amikor három évvel ezelőtt megkerestem őt azzal a kéréssel, hogy az RMKI és az SZFKI összeolvadásából létrejövő új kutatóközpontot édesapjáról nevezhessük el, akkor tétovázás nélkül megadta az engedélyt a már nagybetűs *Martha*. Tulajdonképpen ez volt az utolsó ténykedése elhunyt előtt. Ha *Wigner Jenő* nem ápolta volna olyan jó kapcsolatot a magyar tudós társadalommal, és ha ennek *Györgyi Géza* nem ágyazott volna meg könyvfordításaival, levelezésével, a csoportelmélet és annak fizikai alkalmazása iránti rajongásával, akkor ma lehet, hogy nem lenne *Wigner Fizikai Kutatóközpont* – legalábbis ilyen nevű intézmény.

Hadd fejezzem be azzal, hogy az egykori KFKI, majd RMKI és a mostani *Wigner Fizikai Kutatóközpont* kollégái és munkatársai nevében büszkén állok itt ennél az emléktáblánál. Büszke vagyok arra, hogy *Györgyi Géza* intézetében kutathatok, és kollégáimmal készen állunk arra, hogy sikeresen folytassuk mindazt, amit elődeink elkezdtek és végrehajtottak. „Óriások vállán állunk” – mondtam korábban. De ha már ez megadatott, akkor szeretnénk élni ezzel a lehetőséggel, hogy minél messzebbre láthassunk. Biztos vagyok benne, hogy *Györgyi Géza* is ezt akarta volna, ezt várná el tőlünk.

Hogy annak idején hogyan érezte magát *Györgyi Géza* a KFKI-ban, azt talán csak felesége, *Tünde* tudhatja biztosan, esetleg közeli kollégái. De az utódok nevében bizton állíthatom, hogy jól érezzük magunkat egy olyan kutatóintézetben (most már kutatóközpontban), ahol a *Györgyi Géza*-díjért vetélkednek minden évben a legtehetségesebb fiataljaink, és ahol igyekszünk *Wigner Jenő* nevéhez méltó kutatómunkát folytatni. Hogy jó úton járunk-e, ahhoz az iránytűt a *Györgyi Géza* által lefordított *Wigner*-könyv adhatja számunkra.

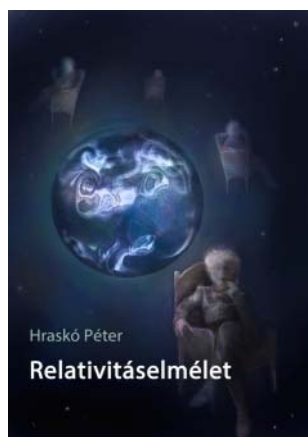
Ezzel a gondolattal szeretnék csatlakozni *Györgyi Géza* emlékének megőrzéséhez, amit ez az emléktábla is megerősít. Büszke vagyok arra, hogy az emléktábla alján a *Wigner Fizikai Kutatóközpont* neve áll, és ez a név továbbra is szorosan kapcsolódik *Györgyi Gézához*. Felkérem *Frenkel Andor* kollégámat, *Györgyi Géza* egykori pályatársát, aki 41 évvel ezelőtt búcsúztatta *Györgyi Gézát*, hogy a *Wigner Fizikai Kutatóközpont* nevében együtt helyezzük el az emlékezés és a tisztelet koszorúját *Györgyi Géza* emléktábláján.

## NYÁRVÉGI AJÁNLO

Olvadni nyáron kell! Pontosabban akkor van rá idő. Már amennyiben az idő valamire van. Mindenesetre nyugodtabb szívvel ajánlok könyveket nyáron. Azoknak is, akik előbb akarják új alapokra helyezni a relativitáselméletet, mint megérteni.

**Hraskó Péter: RELATIVITÁSELMÉLET**  
Typotex, 2015

*Hraskó Péter* munkája kellőképpen átfogó, jól érthető, ugyanakkor igényessége a tudomány kalandorai számára meglehetősen riasztó. Több mint tíz éve jelent meg először és akinek csak szóba hoztam, mind elégedett volt vele. Nemrégiben mégis bajba kerültem az ajánlással, ugyanis a könyv elfogyott. Mostanra helyreállt a rend, megjelent a második, bővített változat e-könyvként, a kézbe vehető kötet árának hozzávetőleg negyedéért. (A borító a szerző unokájának ízlését dicséri.)



Tudjuk jól, hogy a relativitáselmélet nem könnyed nyári olvasmány, szélsőségesen leegyszerűsítő változataiban sem. Hraskó Péter könyve megkívánja a teljes odafigyelést, a bemutatott feladatok kidolgozásánál igényt tart találatkonyságunkra. A könyv első két fejezete a speciális relativitáselméletet fejti ki. „A speciális relativitáselmélet a fizikának azokon a területein megkerülhetetlen, amelyek nagy sebességű mozgásokkal és a részecskék átalakulásaival foglalkoznak. Elsősorban az atomfizika és az elemi részecskék fizikája tartozik ide, amelyeknek az elmélete két tartópilléren nyugszik: a kvantumelméleten és a speciális relativitáselméleten. ... A könyv első két része ezért kizárólag a speciális relativitáselmélettel foglalkozik és annak, akit az elméletnek csak ez a vonatkozása érdekel, elég ezt a két részt áttanulmányoznia. Ha még az általános relativitáselmélet alapjairól is szeretne legalább tájékozódni, elolvashatja a harmadik részt, amely megkísérli a matematikai apparátus felhasználása nélkül bemutatni az elmélet alapgondolatát, a gravitáció geometrizálását” – olvashatjuk a könyv előszavában.

A következő öt fejezet szolgál az általános relativitáselmélet kifejtésére. Ehhez először is a megfelelő matematikai eszközökre van szükség és a bennük

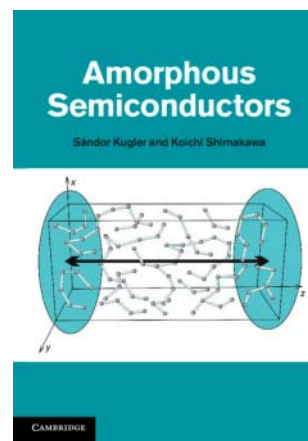
való olyan fokú jártasságra, hogy átérezhessük a Nobel-díjas *I. M. Frank* mottóul választott kijelentésének igazát: „...a fizikában nem a matematika nehéz, hanem a fizika”.

Az Univerzum törvényszerűségeiről kevés értékes állítást tehetünk az általános relativitáselmélet nélkül. Ezért szól a zárófejezet a kozmológia alapjairól.

Hraskó Péter könyve korszerű alpmunkának tekinthető, amely egyúttal tankönyv is, hiszen „...a könyv azoknak a kurzusoknak az anyagára épül, amelyeket néhány év óta tartok az általános relativitáselméletről a Budapesti Műszaki Egyetemen mérnök-fizikus hallgatók számára” – olvashatjuk az előszóban. A fiatalok számára különösen fontos, hogy egy tankönyvet e-könyvként vehetnek kézbe, hiszen a digitalizált szöveget szabadabban használhatják, mint nyomtatott változatát.

**Sándor Kugler, Koichi Shimakawa:**  
**AMORPHOUS SEMICONDUCTORS**  
Cambridge University Press, 2015

Egy másik idén megjelent könyv is a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen tartott előadások alapján született. *Kugler Sándor* és *Shimakawa Koichi* kötetét a Cambridge University Press adta ki. Tekintettel a kötet tárgyára a szerzők könyvüket elsősorban fizikusoknak és villamosmérnököknek ajánlják. Azonban ez a karcsú monográfia mondanivalója áttekinthető felépítéséért, jól követhető érveléséért az érdeklődők jóval szélesebb körére számíthat.



Öt fejezete közül az első a történeti áttekintésé a tudomány és az alkalmazások oldaláról. Itt kell megkísérlni az alapfogalmak definiálását, hogy mi a nem-kristályos, az amorf, az üvegszerű, mi a véletlenszerűség (randomness), mi a rendezetlenség (disorder). A második fejezet az amorf félvezetők előállításai technikáit foglalja össze, a fizikai (termikus párologtatás, porlasztás útján történő), valamint a kémiai gőzfázisú leválasztást. A negyedik fejezet az elektronszerkezettel, az optikai és mágneses tulajdonságokkal, míg az ötödik a fény okozta hatásokkal foglalkozik.

A harmadik fejezet terjedelme akkora, mint a többi együttvéve. A fejezet tárgya az amorf félvezetők szerkezete. Elsősorban neutrondiffrakciós mérések és modellszámítások eredményeire támaszkodva az atomok elhelyezkedését Monte Carlo-szimulációval állapítják meg.

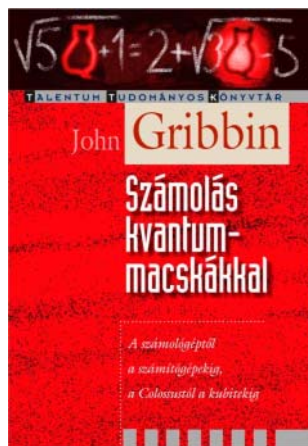
A Monte Carlo-módszer hasadó anyagok kritikus tömegének meghatározását célzó számítások során született, neutronok pályájának számítógépen történő követésére. A módszer előbb a véletlen folyamatok valószínűségi elméletének közvetítésével a numerikus analízis eszközévé vált, és már mint sokoldalúan kidolgozott matematikai eljárást vetették be a fizika különböző területein. Az amorf félvezetők szerkezetének megállapítására is a számítógépes kísérletek számos változatát alkalmazzák, de ebben a fejezetben csak a hagyományos és a fordított (reverse) Monte Carlo-módszerről esik szó. A direkt MC-eljárásnál a kiindulási atomi elrendezés (valamilyen torzított kristályos rend) egy véletlenszerűen kiválasztott atomja véletlenszám-generátor által megállapított új helyzetbe kerül. Az összenergia csökkenése esetén ez lesz az új kiindulási elrendezés. A fordított Monte Carlo-szimulációnál a kísérleti neutron-diffrakciós felvételekkel való összehasonlítás a szerkezet felderítésének alapja.

A könyv 150 oldalnál is kisebb terjedelme megtevésztő, mert igen nagy területet fog át. Az amorf félvezetők szinte minden lényeges tulajdonsága szóba kerül – igaz, röviden, de a szokásosnál jóval terjedelmesebb, fejezetenként megadott hivatkozáslista lehetővé teszi, hogy minden részinformációnak utána nézzünk.

## John Gribbin: SZÁMOLÁS KVANTUMMACSKÁKKAL

Fordította: Both Előd, Akkord Kiadó, 2015

John Gribbin termékeny szerző. Ezt magyarul megjelent 12 vastag kötet is igazolja, amelyek főként kvantummechanikával, kozmológiával, a természettudományok történetével foglalkoznak. A kvantummechanikáról nehéz hitelesen, egyúttal érdeklődést keltően írni. Ha sikerül, még mindig hiányozhat egy blikkfangos cím. A *Schrödinger macskája*



cím annyira jónak bizonyult, hogy 12 évvel később *Schrödinger kiscicái* kerültek a bestseller listára, újabb 16 évvel később pedig a kvantumszámítógépekről szóló könyv *Számolás kvantummacskákkal* címen jelent meg. (Magyarul a gyorsuló idő jegyében az első könyv fordítására 16, a másodikéra már csak 8, a legújabbra mindössze 2 évet kellett várni.)

A kvantummacskás könyv felépítése logikus: a számítógépekről szóló fejezetet a kvantumok bemutatása követi, majd ezek egyesítéseként szól a harmadik fejezet a kvantumszámítógépekről.

A számítógépes rész *Turingról* és *Neumannról* számol be, a következő *Feynmanról* és *Bellről*, ám itt felteleezi, hogy *Schrödinger*ről és az egyenletéről, valamint a koppenhágai iskoláról, ha nem is mindent, de sok mindent tudunk, azaz becsülettel elvégeztünk egy kvantummechanika kurzust vagy gondosan elolvastuk a *Schrödinger macskáját*, majd *Schrödinger kiscicáit*.

A *Schrödinger macskája* 90%-ban a kvantummechanikát hagyományos módon népszerűsítő könyv. A kivételt épp a félig eleven, félig holt cica jelenti, mert itt szokatlan módon felveti Gribbin, hogy a macskát megfigyelő is csak annyiban létező, amennyiben őt éppen megfigyelik. Ezzel együtt az EPR (*Einstein, Podolsky, Rosen*) jelenségek, a Bell-egyenlőtlenségek kísérleti vizsgálata is hangsúlyt kapnak.

*Schrödinger kiscicáiban* erőteljesebb a tudománytörténeti megközelítés, a kvantummechanika koppenhágai értelmezése pedig a józan észnek ellentmondó diszciplínaként jelenik meg. Gribbin a hétköznapi tapasztalathoz ragaszkodó szemléletével inkább el tudja képzelni számtalan Univerzum egyidejű létezését, mintsem a megfigyelő kulcsszerepét a mérésekben. Schrödinger macskájának értelmezéséhez két Univerzum egyidejű létezése is elegendő: az egyikben a cica tökéletesen eleven, a másikban pedig visszavonhatatlanul halott.

A *Számolás kvantummacskákkal* kötetben az eddigi tendenciák érvényesülnek. Sok az életrajzi adat és anekdota – ezek általában nemcsak az odafigyelést könnyítik meg, de sokszor a kutatók eredményeinek alakulását is értelmezik. Alkalmat adnak arra, hogy a szerző kifejezhesse leküzdhetetlen ellenszenvét a koppenhágai értelmezéssel szemben. Így jár pórul az első fejezetben nagyra értékelt Neumann János, amikor előkerül a rejtett paraméterek nemlétére vonatkozó bizonyítása. A szerző egy 1988-as Bell-interjú idézi: „Neumann bizonyítása nem csupán hamis, hanem neveltséges!” Majd öt évvel későbből egy másik szerzőre hivatkozik, aki szerint az érvelés olyan ostoba, hogy „kíváncsi lennék, vajon a bizonyítást valaha is átnézték-e legalább egyetemi hallgatók”. Feltehetően a koppenhágai értelmezéssel szembeni ellenérzés miatt nem esik szó a kvantummechanika eredményeiről, csak a Bell-egyenlőtlenségek utáni kísérletekről és azok lehetséges értelmezéséről. Amit nem érdemes számon kérni a szerzőn, hiszen a könyv tárgya a kvantumszámítógépek működésének bemutatása. Ez korrekt módon meg is történik, és ezért a korrektségért az olvasónak igen sokat kell visszalapozni és utána olvasni. El kell jutnia odáig, hogy belássa, milyen ígéretes dolog, hogy a modern kísérleti technika és hatékony algoritmusok segítségével a 15-öt sikerült törzstényezőire bontani.



Három könyv a nyár végére, amikor a könnyed szórakozásból már elégünk van és elegendő elszántság gyűlt össze bennünk átfogó ismeretek szerzésére, felújítására. A műfajok nem azonosak, a szükséges

elszánás is különböző, de nem annyira, ahogy a közvélekedés tartja. Berendezkedni a téridőben, követni egy sztochasztikus szimuláció felépítését időigényes feladatok, és célszerű is előre megbecsülni lesz-e elegendő időnk hozzá. Ám a kvantummacskáktól se hagy-

juk megteveszteni magunkat, mert az anekdoták és pletykák csak a figyelem elterelésére szolgálnak. Ha a kvantummacskákkal jó barátságban is vagyunk, a velük való számolás nem tűnik egyszerűnek.

Füstöss László

## Oláh Anna: »MINT KEMENCEMESTER IS ORSZÁGSZERTE HÍRES« Bolyai Farkas hőtani elméletei, kemencerakó, -öntő tapasztalatai L'Harmattan Kiadó, Budapest, 2015

Az idén 240 éves *Bolyai Farkas* életrajzírói szinte kivétel nélkül kitérnek azokra az erőfeszítésekre, amelyeket az egyre nagyobb hatékonyságú és egyre több célt szolgáló kemencék tervezésére, építésére szánt. Legtöbbjük forrása *Bedőházi János: A két Bolyai. Élet- és jellemrajz* című, Marosvásárhelyen 1879-ben megjelent terjedelmes monográfiája. Bedőházi ezt írja: „Különösen a kemenczerakásban volt nagy mester. [...] Örök kár, hogy erről írott műve elveszett. Bolyai János írja: »atyám pedig száz meg száz variatioju, minden nemű kemenczéket gondolt, s rakatott önfelügyelete s igazgatása alatt, s részint rakott maga is saját kezével, nagy szenvedélyvel, néha egy éjjel tán kettőt is, s azóta jöttek az országban, s úgy látszik másutt is, dívatba a Bolyai-kemenczék. Messzi vidékről folyamodtak hozzá tanácsért, s a hová csak lehetett, ő maga is elfáradt. Rendesen ősszel indult el egyesek meghívására 'kemenczézni', amint mondogatta. Voltak betanított fazekasai is, de ezekre sokat panaszkodott lassú munkájukért. Kemenczéi közül egy oszlop alakú maradt még a legújabb időkig is használatban, s talán még most is őrzi nevét egy-egy imitt amott látható Bolyai-féle zöld cserép kemencze.«<sup>1</sup>

Nos, az 1980-as évek elején jelen írás szerzője ténylegesen talált egy zöld oszlopkemencét Marosvásárhelyen a hajdani Kövecses (ma Avram Iancu) utcában. Akkor kezdett foglalkozni Bolyai elveszettnek hitt hőtani kézírataival és kemencéivel. A kemencék hatékonyságának kérdése már göttingeni diákkorában foglalkoztatta. Kéziratában azt írja: „Legelső gondolatja volt a sróf-út 1797-ben, Göttingában.” A kutatóegyetem professzorai a kor megoldásra szoruló



kérdéseinek vizsgálatába, mint a hatékony kemencék tervezése, építése, kötelező módon bevonták diákjait is. Bolyai ezt a „sróf” utat tökéletesítette egy fél évszázadon át, míg eljutott az általa Dániel-kemencének nevezett melegítő, sütő főző, forraló, aszaló, szelőlőtető komplex fűtőszerkezetig. Erről szóló száz oldalnál is nagyobb terjedelmű kéziratát egy ládányi egyéb János-irattal együtt a kollégium a MTA-ra küldte átvizsgálás és esetleges kiadás céljából. A lelakatolt ládában lévő iratok közel 30 évet töltöttek a MTA Könyvtárban, anélkül, hogy egyetlen sornyi kéziratot kiadásra méltónak talált volna a tisztelt akadémia. Hazaküldésük után 60 évvel, amikor *Benkő Samu* kutató Marosvásárhelyen átveszi a teljes Bolyai kéziratanyagot, elkezdődik annak több évtizedig tartó szakszerű feldolgozása. Attól kezdve a kemence iratokra gyakran történik utalás. Az iratokat<sup>2</sup> rendeztük, kibetűztük, értékeltük és nemrég kötetben a L'Harmattan Kiadónál megjelentettük.

Bolyai az irat elején tisztázza az ő korában még egészen képlékeny állapotban lévő hőtani alapfogalmakat. A hő természetére vonatkozó következtetései bizonyítékul állnak előttünk arra, hogy a hiányos ismeretmozaikjai közti űrt fejlett elemzőképességgel, aprólékos logikai következtetésekre támaszkodva kitöltötte, és rátapintott a későbbi korok nagy felfedezéseire. Ezt követően összefoglalja a fűtéssel kapcsolatos legfontosabb követelményeket: „A tűznek mindenik használatában megkívántatik: hogy füstölés és gőz nélkül minél célszerűtíbb legyen, az égőnek s kemence költségnek lehető megkímélése, a tűz könnyű tétele, a kigyúlnak megelőzése, s ha megesik, könnyű megoltása, hogy amennyire lehet, egy tűzzel több cél érődjék el.” Arról győződhetünk meg, hogy a kemenczerakás, sütés, főzés, aszalás, a tüzelőanyag gazdaságos felhasználása, végül a tűzoltás komplex kérdéskörét csak szerteágazó matematikai, természettudományos ismeretekkel bíró szakember elemezheti ilyen részletességgel. Az általa alkalmazott, mindenre kiterjedő függvény szemlélet volt sikerének titka. A fűtés hatékonyságában szerepet játszik:

<sup>1</sup> Bedőházi János, 320–322. old.

<sup>2</sup> Lelőhelye: Marosvásárhely, Teleki-Bolyai Könyvtár, Bolyai Farkas iratok, 119, 120 sz. irat.



1. a fűtőanyag minősége és annak nedvességtartalma;
2. a kemencébe jutó levegő oxigéntartalma;
3. a kemence anyaga;
4. a sugárzó felületek mérete;
5. a füstjárat hossza, átmérője, amely a füst sebességét és az elégetlen szén (korom) mennyiségét befolyásolja;
6. a lakóhelyiség, padlás magassága, amely a kémény méreteit, ezáltal a huzat sebességét befolyásolja;
7. a lakóhelyiség földrajzi elhelyezkedése;

8. a lakóhelyiség, kémény kívüli időjárási viszonyok: hőmérséklet, páratartalom, széljárás, a légkör elektromos töltöttsége, a Hold állása, a szomszédos épületek távolsága.

A Dániel-kemencék – a bibliai hasonlatot maga Bolyai honosította meg – megalkotásában Bolyai korának leghaladóbb elméleti ismereteit alkalmazta a fizika, matematika, geometria, vegyészet, erdészet, biológia, meteorológia, esztétika terén. Ennél komplexebb vizsgálatot ma sem nagyon végeznek tudósaink.

*Oláh Anna*

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# A NAP- ÉS A SZÉLENERGIA LAKOSSÁGI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEINEK MODELLEZÉSE ISKOLAI PROJEKTFELADATBAN

Beke Tamás

Nagyasszonyunk Katolikus  
Általános Iskola és Gimnázium, Kalocsa

Iskolánk gimnazista tanulóival megvalósítottunk egy hosszabb projektfeladatot, amelyben az energiaforrások szerepét vizsgáltuk. Ebben a cikkben elsősorban a nap- és a széleenergia lakossági felhasználásának számítógépes modellezéséről és a hozzá kapcsolódó fizikai problémákról szeretnék beszámolni.

## Megújuló energiaforrások

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük az olyan energiaforrásokat, amelyek természeti folyamatok során folyamatosan rendelkezésre állnak vagy újratermelődnek [1]. Ide tartozik a nap-, a szél-, a vízenergia, a biomasz. A megújuló energiaforrásokon belül a nap- és a széleenergia bolygónk felszínének nagy részén rendelkezésre állnak és általában gazdaságosan kinyerhetők. Ez jelenthet nagyüzemi vagy kisfelhasználói kitermelést.

Az iskolai projektben azon a véleményen voltunk, hogy a nap- és a széleenergia felhasználása lakossági szinten sok helyen megvalósítható lehetne. Akik családi házban (saját ingatlanban) laknak, azok a ház tetejét napelemekkel fedhetnék be, a kertben pedig lehetőség nyílna néhány kisebb szélgenerátor felállítására is. Az így termelt villamos energiát pedig részben közvetlenül felhasználhatnák az ott lakók, részben akkumulátorokban tárolhatnák.

Az írás az ELTE Fizika tanítása PhD program keretében készült. Köszönetem fejezem ki *Tél Tamás* professzor úrnak, a kutatási program vezetőjének és a témavezetőnek, *Bene Gyula* egyetemi docensnek, akik hasznos észrevételekkel segítettek a cikk megírásában. Köszönöm a projektben résztvevő tanulók munkáját.

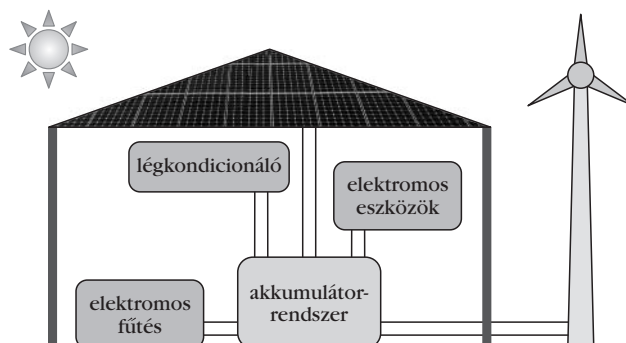
<sup>1</sup> Az árapály- és a geotermikus energiát is ide soroljuk.

A nap- és széleenergia hátrányaként szokták emlegetni, hogy az időszakos működés miatt talán éppen akkor termelnek villamos energiát, amikor nincs rá szükség; ezért a fölöslegesen megtermelt energiát tárolni kell, hogy akkor használhassuk fel, amikor nincs vagy nem elég az energiatermelés. Elméletileg több módszer is szóba jöhet: például akkumulátorok, vízvivattyús-tárolós energiátárolás, vízbontás és a hidrogén eltárolása stb. A hatékony energiátárolás azonban nem egyszerű feladat.

## A házikó projekt

Ebben a részprojektben azt vizsgáltuk, hogy egy átlagos magyar háztartás energiaszükségletét fedezni tudnánk-e a nap- és a széleenergia segítségével. Valódi ökoház építésére nem volt pénzünk, helyette virtuáli-

1. ábra. A modellszákház: napelemek a tetőn, szélgenerátor az udvarban, az elektromos energiát akkumulátorokban tároljuk, a ház természetesen villamos fogyasztókat is tartalmaz.



san építettünk egy ilyen házikót napelemekkel, szél-generátorokkal és energiatároló akkumulátorokkal, valamint villamos fogyasztókkal (1. ábra). Azaz – a tanulókkal közösen – olyan számítógépes modellt készítettünk, amelyben a ház és környezetének fontosabb energetikai jellemzőit vizsgáltuk.

## Adatok gyűjtése

A projektben 30 tanuló és jómagam vettünk részt; összességében  $N = 31$  háztartás statisztikai adataival dolgoztunk. Elsőként kiszámoltuk, hogy mekkora egy átlagos háztartás. A projektben résztvevők adatai alapján  $n_a \approx 4$  fő adódott, illetve a házak (lakások) alapterületeinek átlaga  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  volt. (Ne feledjük, mi vidéken, családi házas környezetben élünk!)

## Energiafogyasztás

A projekt részeként a tanulók saját otthonukban figyelték a napi energiafogyasztásukat, illetve magam is feljegyeztem az otthon mért értékeket. Minden résztvevő minden nap azonos időpontban (esténként) leolvasta a villany- és a gázórák állását, illetve szobamérlegen megmérték, hogy aznap mennyi fát, szenet fűtöttek el (akik így – is – fűtenek). A tüzelőanyagok fűtőértékeit táblázatokból kerestük ki. Ezek alapján már mindenki kiszámolhatta az adott napi energiafelhasználását. A lakások és a környezet hőmérsékletét is feljegyeztük. Ez az adatgyűjtés segítette a tanulókat abban, hogy a hosszú távú munkavégzés fontosságát megértsék.

Az adatokat másnap összesítettük és kiszámítottuk, hogy az előző napon egy  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  alapterületű, átlagos méretű házban összességében átlagosan mennyi  $E_{\text{össznapiátlag}, i}$  energia fogyott (elektromos eszközök, fűtés, hűtés). Először mindenki kiszámította az adott napra a saját otthonában az 1 főre és az 1  $\text{m}^2$  alapterületre eső energiafogyasztást, majd ezeket az értékeket átlagoltuk; ezután megszoroztuk a házikóban lakók számával és a házikó alapterületével.

Az adatokat 2012. szeptember 30-tól (0. nap) kezdődően, 2014. szeptember 30-ig (730. nap) gyűjtöttük. Két évet vizsgáltunk, hogy két teljes fűtési szezon és két teljes fűtés nélküli szezon is reprezentálva legyen.

Az átlagolások alapján az  $A_a \approx 100 \text{ m}^2$  alapterületű átlagos házra (lakásra), amelyben  $n_a \approx 4$  fő lakik, naponta átlagban  $E_{\text{villamosnapiátlag}} \approx 10,02 \text{ kWh} \approx 36,08 \text{ MJ}$  villamos energiát használnak. A napi átlagos villamosenergia-fogyasztás tekintetében nem volt jelentős eltérés a fűtési szezon (körülbelül 37 MJ/nap), illetve az azon kívüli időszak (körülbelül 35 MJ/nap) között.<sup>2</sup> Az 1. táblázatban az átlagos háztartás napi átlagos energiaszükséglete látható a fűtési szezonban, illetve azon kívül.

A fűtési szezonban – gyakorlatilag október első felétől április közepéig – a vezetékes földgáz fogyasztása napi átlagban  $4,21 \text{ m}^3$  volt, ami  $E_{\text{gáznapiátlag}} = 143 \text{ MJ}$

<sup>2</sup> Az egyes napok és az egyes családok tekintetében természetesen jelentős fluktuációk adódtak.

a felhasznált energia forrása	átlagos energiafelhasználás (MJ)	
	fűtési szezonban	fűtési szezonon kívül
villany	37	35
gáz	143	40
fa	308	0
szén	21	0
összesen	509	75

Az értékek egészre kerekítettek.

energiát jelent.<sup>3</sup> Emellett a fűtési szezonban naponta átlagban körülbelül 20,5 kg fát is eltüzelünk a lakások fűtésére. A különböző elégetett fafajták fűtőértékeit súlyozottan vettük figyelembe, így a fűtési szezonban fa elégetéséből naponta átlagosan  $E_{\text{fanapiátlag}} = 308 \text{ MJ}$  energia származott. A tanulók közül szénnel alig néhányan (és ők is időszakosan) fűtöttek, körülbelül 1,4 kg szén fogyott napi átlagban, eszerint a fűtési szezonban szénből naponta körülbelül  $E_{\text{szénnapiatlag}} = 21 \text{ MJ}$  energia származott.

Felmerülhet a kétely, hogy a fűtési szezonban napi átlagban tényleg ilyen sok energiát fogyaszt egy átlagos háztartás? Sajnos igen. A projektben résztvevők közül többen hagyományos, körülbelül 100  $\text{m}^2$  alapterületű „kocka” családi házban laknak, és általában gázzal és fával vegyesen fűtenek. A hőszigeteléstől, nyílászáróktól, hőigénytől, kályhák, kandallók, kazánok típusától függően egy ilyen családi házban éves szinten fűtésre körülbelül 30-50 mázsa kemény tűzifát és mintegy 500-1000  $\text{m}^3$  földgázt használnak el. A száraz, kemény tűzifák (például akác, tölgy, bükk, gyertyán, kóris) fűtőértéke körülbelül 15-16 MJ/kg, azaz egy fűtési szezonban ebből körülbelül 45 000-80 000 MJ az energiafogyasztás. Ha ezt elosztjuk 185 nappal, akkor a tűzifa esetén mintegy 243-432 MJ/nap átlagos fogyasztást kapunk. A földgázból körülbelül 92-184 MJ/nap az átlagfogyasztás. Láthatjuk, hogy ezek összhangban vannak az általunk meghatározott átlagértékekkel.<sup>4</sup>

Összességében egy átlagos háztartás a fűtési szezonban naponta átlagosan körülbelül 509 MJ, a fűtési szezonon kívül pedig 75 MJ energiát használ fel. Az adott időszakban naponta átlagosan ennyi energiát kellene „megtermelnünk” ahhoz, hogy házikónk energetikailag fenntartható legyen. A helyzet ennél persze bonyolultabb, hiszen a felhasznált és a megtermelt energia is naponként változik. Az átlagérté-

<sup>3</sup> A vezetékes földgáz fűtőértéke 32-42 MJ/ $\text{m}^3$ , ez a gáz több paraméterétől is függ. Magyarországon a vezetékes földgáz fűtőértéke átlagosan körülbelül 34 MJ/ $\text{m}^3$ .

<sup>4</sup> Egy kisebb méretű, korszerűen szigetelt, társasházban lévő lakás esetén a fűtési energiafelhasználás ennek töredéke is lehet; főként, ha a szomszédok alulról-felülről és oldalról is melegítik az adott lakást. Egy szigetelés nélküli, nagyobb méretű, különálló ház esetében viszont a fűtési energiaköltségek nagyon jelentősek.

kek kiszámítását csak azért mutattam be, mert a vizsgálatok előtt a tanulóknak sejtelmük sem volt, hogy mennyi egy átlagos háztartás naponkénti energiafogyasztása.

A projektben a napi adatok alapján kiszámolhattuk a virtuális házikónk és a benne élő  $n_a \approx 4$  fős átlagos család előző napi összes átlagos energiafogyasztását, illetve kiszámolhattuk, hogy mennyi energiát tudunk volna az előző napon a virtuális napelemekkel és szélgenerátorokkal megtermelni.

Vizsgálataink alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy virtuális házikónk a fűtési szezonon kívül fenntartható módon működik, azaz a nap- és a szélenergia felhasználásával biztosítani lehet egy átlagos háztartás villamosenergia-szükségletét. Ne feledjük, hogy a fűtési szezonon kívül (körülbelül április közepétől október elejéig) általában elég sok a napsütéses órák száma, azaz a fotovoltaikus napelemeink szinte minden nap működhetnek.<sup>5</sup>

A számításaink szerint a fűtési szezonban a fűtéshez szükséges átlagos energiaigényt viszont ezzel a módszerrel nem tudnánk kielégíteni. A fűtési szezonban (körülbelül október elejétől április közepéig) a háztartás energiaigénye megnövekszik, ráadásul ilyenkor általában alacsonyabb a napsütéses órák száma, kevesebb villamos energiát lehet a fotovoltaikus napelemekkel megtermelni. Valamilyen kiegészítő megoldás szükséges. Egyfelől a ház szigetelését mindenképpen meg kell oldani, másfelől hőigényünket mérsékelhetjük, ha jobban felöltözünk, így a lakásban alacsonyabb lehet a hőmérséklet. Mondjuk, a ház belsejében 23 °C helyett elegendő lenne 20 °C-os hőmérséklet, és így nagyon sok energiát megtakaríthatunk.

## A számítógépes program

A tanulók mérései alapján az átlagolások után rendelkezésre álltak a szükséges napi adatok: a ház környezetének és a ház belsejének hőmérséklete, a napsütéses órák száma, a szél erőssége, időtartama.

Az előzőekben láttuk, hogy a fűtési energiaigény reálisan nem fedezhető a nap- és szélenergiából a fűtési szezonban. Ezért a program készítése során két megoldás közül választhattunk: vagy lemondunk a fűtésről, vagy olyan jó hőszigetelési paramétereket választunk a háznak, hogy ezáltal a fűtéshez szükséges energiaigény jelentősen csökkenjen, és akkora tárolókapacitású akkumulátorrendszert telepítünk, ami ennyi energia tárolására alkalmas. Az első megoldás egyszerűbb, ha például fával fűtünk. A másik megoldás bonyolultabb, ráadásul abban az értelemben sem reális, hogy télen a fűtésre sok energiát használunk. Mégis ezt választottuk azért, mert a házikó szigetelése tényleg jelentősen javítható: lehetnének akár 4 rétegű hőszigetelt ablakok és 15-20 cm vastag falszigetelések stb. és a virtuális akkumulátorok tárolókapacitása elméletben szabadon növelhető.

<sup>5</sup> A szélgenerátorok működése a szélről függ.

## A modell

A programban az egyszerűség kedvéért a házikót egy belsejében üreges – válaszfalak nélküli – téglatesttel modelleztük. A téglatest alaplapjának élhosszai  $a$  és  $b$ , magassága  $h$ , a ház falainak vastagsága egységesen  $d$ .

A programba mindig az előző napi adatokat írtuk be, így a valósághoz képest egy napos időeltolódással működött. Arra voltunk kíváncsiak, hogy az  $i$ -edik napon a virtuális házikóban mennyi energiát kell felhasználni ahhoz, hogy a ház  $T_{belső\hat{a}tlag, i}$  átlagos belső hőmérsékletét olyan értéken tarthassuk, amit a tanulók átlagban mértek otthon, és a ház villamosenergia-igényét is megoldjuk.

Az egy napos időcsúszásra azért volt szükség, hogy az előző nap összesített helyi meteorológia adatok (például helyi napsütéses órák száma, helyi szélviszonyok) rendelkezésünkre álljanak. A hőmérséklet-adatokat a projektben résztvevő tanulók feljegyezték otthon, illetve napközben az iskolában, és a helyi meteorológiai állomás adatait is felhasználtuk. A különböző forrásokból származó adatokat összesítettük és átlagoltuk.

## Termelt energia

### Napenergia

Egy napelem elektromos teljesítménye [2]:

$$P_{napelem}(t) = \eta_{napelem} A_{napelem} I(t),$$

ahol  $A_{napelem}$  a napelem területe;  $I(t)$  a napsugárzás átlagos felületi teljesítménysűrűsége a tetőnél. Az  $\eta_{napelem}$  a napelemek fotovoltaikus energiaátalakítását jellemző hatásfok. Az  $i$ -edik napon a napelemek által megtermelt  $E_{napelem, i}$  összes villamos energiát úgy kapjuk, hogy a működő napelemek  $N_{napelem}$  számát a napelem pillanatnyi teljesítményét és a működés rövid  $\Delta t$  időtartamát összeszorozzuk, majd ezeket a teljes nap folyamán összeadjuk.<sup>6</sup>

A virtuális házikó tetején helyezkednek el a napelemek. A működő napelemek száma:

$$0 \leq N_{napelem} \leq N_{napelem\ max} = \frac{A_{tető}}{A_{napelem}},$$

azaz modellünkben legfeljebb annyi napelemünk lehet, amennyi még elfér a tetőn.<sup>7</sup>

### Szélenergia

Egy szélgenerátor teljesítménye a szél sebességének harmadik hatványával arányos [3]:

$$P_{szélgenerátor}(t) = \eta_{szélgenerátor} \frac{\rho_{levegő}}{2} A_{rotor} v_{szél}^3(t),$$

<sup>6</sup> Vizsgálatainkban a  $\Delta t$  értéke 5 perc volt, mert a helyi meteorológiai állomás adatai 5 percenként frissültek.

<sup>7</sup> A valóságban akár a kertben is felállíthatnánk még külön napelemmodulokat, vagy a ház oldalára is szerelhetnénk néhányat.

ahol  $\rho_{\text{levegő}}$  a levegő sűrűsége,  $A_{\text{rotor}}$  a szélgenerátor rotorjának felszíne,  $v_{\text{szél}}$  a szél sebessége, az  $\eta_{\text{szélgenerátor}}$  a szélgenerátor energiaátalakítását jellemző hatásfok.<sup>8</sup>

Az  $i$ -edik napon a házikó mellett felállított szélgenerátorok által megtermelt  $E_{\text{szélgenerátor}, i}$  összes elektromos energiát úgy kapjuk, hogy a működő szélgenerátorok  $N_{\text{szélgenerátor}}$  számát, a szélgenerátorok pillanatnyi teljesítményét és a működés rövid  $\Delta t$  időtartamát összeszorozzuk, majd ezeket a teljes napra összesítjük.

A szélgenerátorok csak megfelelő szélesebségtartományban – körülbelül 1 m/s és 15 m/s között – működhetnek. Túl alacsony szélesebség esetén nem működnek vagy nem gazdaságos a működtetésük, túl magas szélesebség esetén nem biztonságosak, ezért csak a megfelelő tartományba eső értékeket vettük figyelembe.

### A ház és környezete közötti energiatranszport

A ház a szabad felszínén cserélhet energiát a környezetével. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a ház az alapja irányában nagyon jól hőszigetelt, azaz csak a tetején, illetve az oldallapjain adhat le vagy vehet fel energiát. Ezeket figyelembe véve a ház szabad felszíne:

$$A_{\text{szabad}} = ab + 2(a + b)b.$$

A szabad felszínnel arányos hőcsere egyfelől függ az adott napon mért külső hőmérséklet és az elérni kívánt belső hőmérséklet különbségétől, másrészt a ház szabad felszínének (tető + oldalfalak) hőátbocsátó képességétől. Ha a tető és a falak hőátbocsátó képessége jó, akkor rossz a hőszigetelésük: a hőátbocsátó képesség és a hőszigetelő képesség fordítottan arányosak. A ház szabad felszínén a hőátbocsátási teljesítmény [4]:

$$P_{\text{bőát}} = kA_{\text{szabad}}(T_{\text{külső}} - T_{\text{belső}}),$$

ahol  $P_{\text{bőát}}$  a ház és környezete közötti hőátbocsátási teljesítmény,  $T_{\text{belső}}$  a ház belső hőmérséklete,  $T_{\text{külső}}$  a ház környezetében mért hőmérséklet,  $k$  a ház szabad felszínének hőátbocsátási együtthatója, amely a programban megadott értéktartományban választható paraméter. Az  $i$ -edik napon a hőátbocsátás során a teljes  $E_{\text{bőát}, i}$  energiatranszportot megkapjuk, ha a pillanatnyi hőátbocsátási teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd az adott napra összesítjük.

A ház hőszugárzás útján is leadhat vagy felvehet energiát. A Stefan–Boltzmann-törvény szerint a sugárzási teljesítmény függ a test felszínének nagyságától, valamint a test, illetve a környezet abszolút hőmérsékletének negyedik hatványai különbségétől [5]:

$$P_{\text{bősug}} = \varepsilon \sigma A_{\text{szabad}}(T_{\text{külső}}^4 - T_{\text{belső}}^4),$$

<sup>8</sup> A hatásfok valójában függ a szél sebességétől is, de ezt az egyszerűség kedvéért elhanyagoltuk.

ahol  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  a Stefan–Boltzmann-együttható,  $\varepsilon$  az emissziós tényező, amely függ a ház szabad felszínének anyagától, szemcsézettségétől, színetől stb. Az  $i$ -edik napon a hőszugárzás során a teljes  $E_{\text{bősug}, i}$  energiatranszportot megkapjuk, ha a pillanatnyi hőszugárzási teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összeadjuk.

Ha  $E_{\text{bőát}, i} + E_{\text{bősug}, i} > 0$ , akkor a házikó az  $i$ -edik napon – a falakon és a tetőn keresztül – a környezetétől összességében energiát vesz fel, ha  $E_{\text{bőát}, i} + E_{\text{bősug}, i} < 0$ , akkor a házikó a szabad felszínén az adott napon összességében energiát ad le a környezetének.

### Fűtés

A modellben a fűtési szezonban az adott napon a kívánt belső hőmérséklet eléréséhez a házikót  $P_{\text{fűt}}$  elektromos teljesítményű villanykályhával fűtjük. Az  $i$ -edik napon a villanykályha működéséhez szükséges összes  $E_{\text{fűt}, i}$  energiát megkapjuk, ha a pillanatnyi fűtési teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összeadjuk.

A villanykályha által az  $i$ -edik napon leadott (hasznos) hő, amely a házikó belső energiáját növeli:

$$E_{\text{fűtbasznos}, i} = \eta_{\text{fűt}} E_{\text{fűt}, i},$$

ahol  $\eta_{\text{fűt}}$  a villanykályha fűtési hatásfoka.<sup>9</sup>

Ha a fűtési szezonban a megkívánt belső hőmérséklet kisebb az aktuális külső hőmérsékletnél, azaz  $T_{\text{belső}} < T_{\text{külső}}$  akkor a fűtésre nem kell energiát használnunk, mert a program szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi melegebb levegőt engedünk be kintől, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet – egy meleg őszi napon a valóságban sem kell a lakást külön fűteni.

### Hűtés

A nyári szezonban a lakás hűtésére felhasznált hűtési energiát – az előjelek figyelembe vételével – hasonló képletekkel számíthatjuk. A házikót  $P_{\text{hűt}}$  elektromos teljesítményű légkondicionálóval hűtjük. Az  $i$ -edik napon a légkondicionáló működéséhez szükséges  $E_{\text{hűt}, i}$  villamos energiát megkapjuk, ha a légkondicionáló berendezés pillanatnyi hűtési teljesítményeit és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük.

Az  $i$ -edik napon a légkondicionáló által elvont (hasznos) hő, amely a házikó belső energiáját csökkenti:

$$E_{\text{hűtbasznos}, i} = j_{\text{hűt}} E_{\text{hűt}, i},$$

ahol  $j_{\text{hűt}}$  a légkondicionáló hűtési jóság foka. A modern légkondicionáló berendezések hűtési jóság foka általában 3 körüli érték.

<sup>9</sup> Ellenállásfűtés esetén a teljes villamos energia hővé alakul. Némelyik szimulációnál 95%-os hatásfokkal számoltunk, mert például az elektromos fűtőberendezés ventilátorainak forgatásához is kell energia.

Ha a nyári szezonban a megkívánt belső hőmérséklet nagyobb az aktuális külső hőmérsékletnél, azaz  $T_{belső} > T_{külső}$ , akkor a hűtésre nem kell energiát felhasználnunk, mert a program szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi hidegebb levegőt engedünk be kintől, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet – egy hűvösebb nyári napon a valóságban sem kell a lakást külön hűteni.

A házikóban a villanykályha és a légkondicionáló kivételével a többi elektromos berendezés (például lámpák, televízió, háztartási gépek) által elfogyasztott villamos energiát külön számoltuk, az  $i$ -edik napon ezt  $E_{villamos, i}$ -vel jelöltük.

Modellünkben a különböző együtthatókat úgy választottuk, hogy értékük nagyjából reális legyen (például az egyes határfokokat internetes katalógusokból kerestük ki); a szabad paramétereket úgy próbáltuk illeszteni, hogy a lehető legjobban visszaadják a tanuló mérésekből számított átlagértékeket.

## Tárolt energia

### Házikó

A ház falaiban és a bent lévő levegőben belső energiaként „tárolódik” a házikó energiájának jelentős része. A bent lévő levegő belső energiája függ a levegő  $\rho_{levegő}$  sűrűségétől,  $V_{levegő}$  térfogatától és  $c_{levegő}$  izochor fajhőjétől.<sup>10</sup> A ház falainak<sup>11</sup> belső energiája függ a fal  $\rho_{fal}$  sűrűségétől és  $V_{fal}$  térfogatától, azaz a falak tömegétől, illetve a  $c_{fal}$  fajhőjétől. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a falak külső oldalán a hőmérséklet  $T_{külső, i}$ , a falak belső oldalán a hőmérséklet  $T_{belső, i}$  és a hőmérséklet egyenletesen változik a falakban. Felírhatjuk a ház átlagos belső energiáját az  $i$ -edik napon:

$$E_{belső, i} = \rho_{levegő} V_{levegő} c_{levegő} T_{belső, i} + \rho_{fal} V_{fal} c_{fal} \frac{T_{belső, i} + T_{külső, i}}{2}.$$

### Akkumulátorok

A napelemek és a szélgenerátorok által megtermelt villamos energia egy részét az akkumulátorokban tárolhatjuk. Az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes villamos energiát  $E_{akku, i}$ -vel jelöljük. Az akkumulátorokban felhalmozott energia nem lehet negatív, illetve nem haladhatja meg az akkumulátorrendszer maximális tárolókapacitását:

$$0 \leq E_{akku, i} \leq E_{akku\max}.$$

A programban a virtuális akkumulátorok szerepe nagyon fontos. Az akkumulátorok  $E_{akku\max}$  energiátároló összkapacitása változtatható paraméter volt, nagyrészt ennek nagysága szabta meg, hogy a házikó energetikailag fenntartható módon működik-e.

<sup>10</sup> A levegő sűrűsége függ a hőmérsékletétől és a nyomásától.

<sup>11</sup> Csak külső falai vannak házikónknak, belső elválsztófalak nem szerepelnek a modellben.

A valóságban az akkumulátoros energiátárolással maximum a háztartás elektromos energiaszükségletét lehetne biztosítani (tavasztól ősziig), a fűtést nem. A programban viszont szabadon adhattunk értéket a virtuális akkumulátor-rendszer maximális tárolókapacitásának, így végig sikerült fenntartani a virtuális házikó energetikai működését.

## Simuláció

A rendelkezésre álló adatok alapján a programmal szimulálhattuk, hogy házikónknak az adott napon fenntartható-e a kívánt hőmérséklet, van-e elegendő villamos energiánk az egyéb fogyasztók működtetéséhez is. Természetesen előfordult, hogy egy adott napon nem termeltük meg az aznapra szükséges energiát, de ez nem okoz problémát, ha az akkumulátorokból pótolni tudjuk a hiányzó mennyiséget. Máskor viszont több energiát termeltünk, mint amennyit aznap elfogyasztottunk, így a felesleggel a virtuális akkumulátorokat tölthetjük, de a rendszer maximális tárolókapacitását nem léphettük túl.

Ha az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok által megtermelt összes energia és az előző napról az akkumulátorokban megmaradt energia összege nagyobb vagy egyenlő az aznapi teljes villamosenergia-fogyasztással, akkor virtuális házikónk az  $i$ -edik napon energetikai szempontból fenntartható módon működik.

### Fűtési szezon

A fűtési szezonban az  $i$ -edik napon a ház belső energiája a villanykályhával történő fűtés és a környezettel való hőcsere miatt változik:

$$E_{belső, i} = E_{belső, i-1} + \eta_{fűt} E_{fűt, i} + E_{bőát, i} + E_{bősug, i}.$$

Az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a villanykályhák fogyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát. Ha az adott napon marad felesleges elektromos energiánk, akkor ezt az akkumulátorokban tároljuk, azaz a téli szezonban az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia:

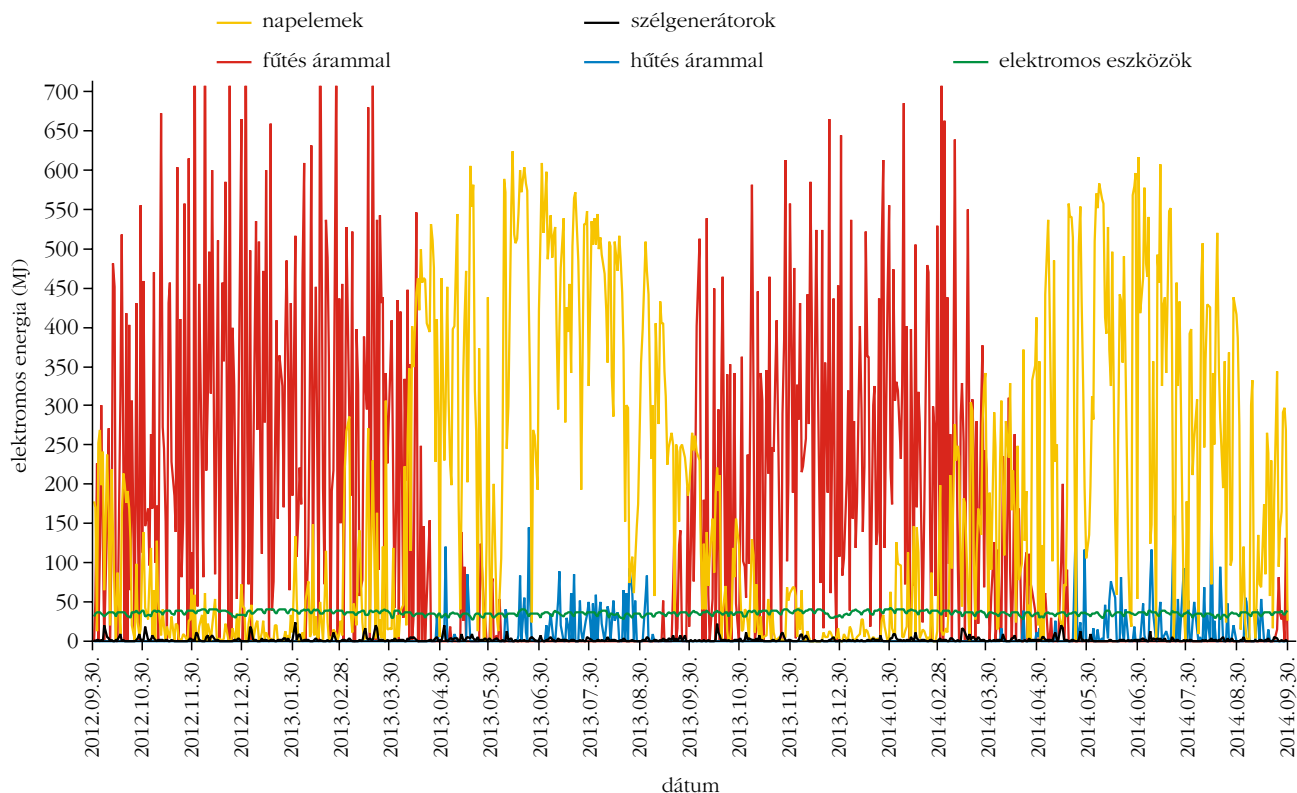
$$E_{akku, i} = E_{akku, i-1} + E_{napelem, i} + E_{szélgenerátor, i} - E_{fűt, i} - E_{villamos, i}.$$

### Hűtési szezon

A nyári szezonban a ház belső energiája a légkondicionálás és a környezettel való hőcsere miatt változik az  $i$ -edik napon:

$$E_{belső, i} = E_{belső, i-1} - j_{hűt} E_{hűt, i} + E_{bőát, i} + E_{bősug, i}.$$

Az  $i$ -edik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a légkondicionáló fo-



2. ábra. A ház elektromos berendezései által két év alatt elfogyasztott, illetve termelt villamos energia a szimuláció – adatait lásd a szövegben – alapján.

gyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát. Ha az adott napon marad felesleges villamos energiánk, akkor ezt az akkumulátorokban tároljuk, azaz a nyári szezonban az  $i$ -edik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia:

$$E_{akku, i} = E_{akku, i-1} + E_{napelem, i} + E_{szélgenerátor, i} - E_{bűt, i} - E_{villamos, i}$$

Az előbbi egyenletek modellházikónkat energetikai szempontból leírják. Kérdés, hogy reális adatokkal – tanulók méréseiből eredő átlagértékekkel, illetve katalógusokban található adatokkal – számolva fenntartható-e a házikó működése a 2 éves vizsgált időszakban.

### Kiindulási paraméterek

A szimuláció szempontjából fontosak a kiindulási paraméterek. Ha a projekt elején az akkumulátorok lemerültek lettek volna és napokig nem süt a nap, nem fűj a szél, akkor a házikónk nem tudott volna működni. Ezért teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük a szimulációt. Természetesen így is leállhat a házikó működése, ha hosszú ideig nincs energiautánpótlás – például túl sokáig nem süt ki a nap, vagy nem fűj a szél, vagy nagyon hideg a tél stb.

A 2. ábrán egy konkrét szimuláció eredményeit láthatjuk. Ennél a szimulációnál a téglatest alakú modellházunk élhosszai  $a = 10$  m,  $b = 10$  m,  $h = 3$  m és falvastagsága  $d = 0,4$  m. A falak  $k$  hőátbocsátási

együtthatója  $0,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , a falak  $\varepsilon$  emissziós tényezője  $0,12$ . A szimulációban 4 szélgenerátorral számoltunk. A szélgenerátor energiaátalakítását jellemző  $\eta_{szélgenerátor}$  hatásfok  $30\%$ , a rotor  $A_{rotor}$  felszíne  $4 \text{ m}^2$ . A napelemek energiaátalakítását jellemző  $\eta_{napelem}$  hatásfok  $15\%$ , egy napelem  $A_{napelem}$  felszíne  $1 \text{ m}^2$  – ekkor a működő napelemek maximális száma  $100$  lehet. Az elektromos fűtés  $\eta_{fűt}$  hatásfoka  $95\%$ , a légkondicionáló  $j_{bűt}$  jóság tényezője  $3$ . A levegő  $\rho_{levegő}$  sűrűsége körülbelül  $1,2 \text{ kgm}^{-3}$  (függ a levegő paramétereitől), a levegő  $c_{levegő}$  (izochor) fajhője  $712 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , a fal  $\rho_{fal}$  átlagsűrűsége  $1500 \text{ kgm}^{-3}$ , a fal anyagának  $c_{fal}$  átlagos fajhője  $880 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

Láthatjuk, hogy az energiatermelés szempontjából a napelemek a jelentősek, a 4 szélgenerátor energiatermelése ehhez képest elenyésző, az ábra aljánál alig látszik, annyira kicsi. Elméletben a házikó mellett több szélgenerátort is felállíthatunk, ekkor az összesített energiatermelésük már jelentősebb lehet.

A háztartás elektromos eszközeinek energiafogyasztása nagyjából állandónak tekinthető a teljes időszakban. A légkondicionáló berendezést csak a nyári szezonban, időnként kell működtetni. A legtöbb energia a modellházikó villanykályhákkal történő fűtésére megy el a fűtési szezonban.

A két év alatt a projektben résztvevő tanulók házaiban a fosszilis energiaforrások (földgáz, fa, szén) eltüzeléséből a két fűtési szezonban, napi átlagban  $472$  MJ összes energiafogyasztás adódott háztartásonként. A hagyományos vegyes tüzelésű kályhák, kazánok, illetve gázkazánok hatásfoka (típustól függően) körül-

belül 25-35%. Ezek alapján a fűtési szezonokban napi átlagban a ház tényleges fűtésére fordított hasznos hő nagyjából 118 MJ/nap és 165 MJ/nap között lehet.

A szimulációban a fűtési szezonokban a modellház elektromos fűtésére naponta átlagosan 138,7 MJ energiát használtunk. Az elektromos fűtés hatásfokát 95%-nak vettük, így a modellház tényleges fűtésére fordított hasznos hő körülbelül 146 MJ/nap lehet. Láthatjuk, hogy ez jó összhangban van a fosszilis energiaforrásokból származó hasznos átlagos fűtési energiaértékekkel.

Ebben a szimulációban az akkumulátor-rendszer összkapacitására minimum 47 729 MJ értéket kellett választanunk, mert a ház folytonos energetikai működését csak így lehetett végig biztosítani. A szimulációt teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük. A téli szezonban termeltünk ugyan valamennyi villamos energiát, de nagyrészt az akkumulátorokról táplált villanykályhák segítségével tudtuk a ház fűtését megoldani. A tél végére az akkumulátorok szinte teljesen lemerültek. A tavasz és a nyár folyamán a felesleges villamos energiával az akkumulátorokat feltöltöttük, és a következő ősztől kezdve nagyjából hasonló módon ismétlődött a folyamat. A szimulációban a virtuális akkumulátor-rendszerünk minimálisan szükséges tárolókapacitására olyan nagy érték adódott, ami megerősíti azt a korábbi feltevésünket, hogy a téli fűtéshez szükséges villamos energia a valóságban így nem tárolható.

Ha reálisabban gondolkodunk és a ház villamos fűtéséről lemondunk (például fával fűtünk – az is megújuló energia), akkor a szimuláció szerint (minimum) 2096 MJ akkumulátor-összkapacitás elegendő a ház működtetéséhez. Ebbe beletartoznak a különböző elektromos berendezések, még a légkondicionáló is.<sup>12</sup>

Érdemes azt is megvizsgálni, hogy milyen összegű beruházásra lenne szükség egy ilyen ház energetikai fenntarthatóságához.

- A napelemrendszer kiépítése nagyjából 3-6 millió Ft lenne (a napelemeket várhatóan körülbelül 25-30 évenként kell cserélni).
- Nézzük meg, hány darab akkumulátorra lenne szükségünk, és mennyibe kerülne ez a módszer! Az egyszerűség kedvéért a bonyolult technikai részletektől tekintsünk el, elegendő, ha megbecsüljük a költsé-

<sup>12</sup> Ez is jelentős energiátárolási kapacitást jelent, de a valóságban esetleg kivitelezhető, bár nagyon sokba kerülne.

geket. A gépkocsiban használatos, 12 V-os, jó minőségű, savas ólomakkumulátor (amelynek ára mintegy 25 000 Ft) körülbelül 2,5 MJ elektromos energiát képes tárolni. A 2100 MJ energia tárolásához tehát 840 darab ólomakkumulátorra lenne szükségünk, ezek ára körülbelül 21 millió Ft (1 J tárolása 1 Ft-ba kerül). Az elektromos és a hibrid üzemű gépkocsikban használatos lítiumion akkumulátorokból kevesebbre lenne szükségünk, viszont a rendszer kiépítésének ára még ennél is jóval magasabb lenne. Láthatjuk, hogy a költségek is nagyon magasak és ennyi akkumulátor tárolása, kezelése is nagyon nehéz feladat lenne.

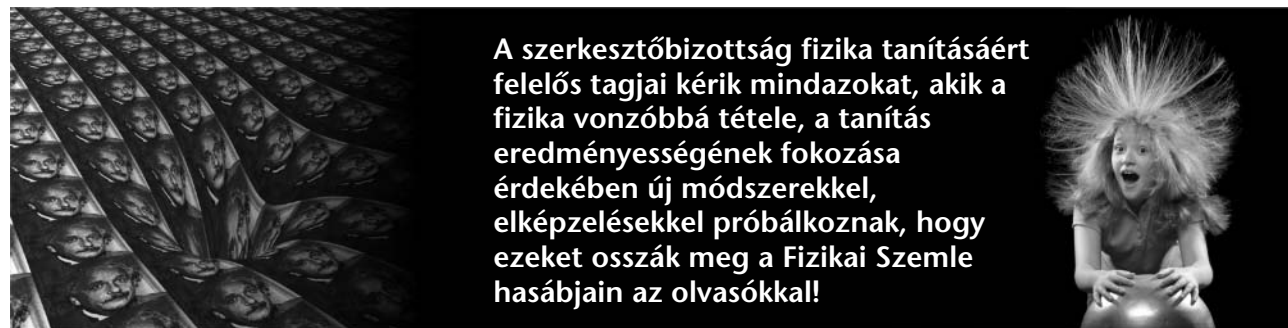
Az akkumulátorok nem környezetbarát eszközök, és élettartamuk sem végtelen. Milyen hulladékok származnak ezekből? Milyen mértékben lehet az anyagokat újrahasznosítani? Ezek fontos kérdések lehetnek, ha ilyen házak nagy számban elterjednének. A projektben ilyen összefüggésekről is esett szó, de ez már túlmutat a cikk lehetőségein.

## Összegzés

Iskolánk tanulóival áttekintettük a megújuló energiaforrások közül a nap- és a szélenergia felhasználásának lakossági módszereit, azok előnyeit és hátrányait. A cikkben bemutattam egy középiskolai szinten is megérthető modellt, amely egy napelemekkel és szélgenerátorral működő különálló ház energetikai leírására szolgál. A projektben előkerülő ismeretek egy része szerepel a középiskolai tananyagban, de voltak benne olyanok is, amelyek a fizika tananyagot hasznosan kiegészítették. A projektfeladat során sikerült a tanulóink fizika szaktárgyi tudását bővíteni és emellett informatikai ismereteik is gyarapodtak, illetve környezettudatos gondolkodásmódjuk is fejlődött.

## Irodalom

1. Láng István (szerk.): *Környezetvédelmi lexikon*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1993.
2. M. Blasono, F. Dell'Anno, R. De Luca, G. Torre: A simple mathematical description of an off-grid hybrid solar-wind power generating system. *Eur. J. Phys.* 34 (2013) 763–771.
3. R. De Luca, P. Desideri: Wind energy: an application of Bernoulli's theorem generalized to isentropic flow of ideal gases. *Eur. J. Phys.* 34 (2013) 189–197.
4. Budó Á.: *Kísérleti fizika I.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.
5. Budó Á.: *Kísérleti fizika III.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997.



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

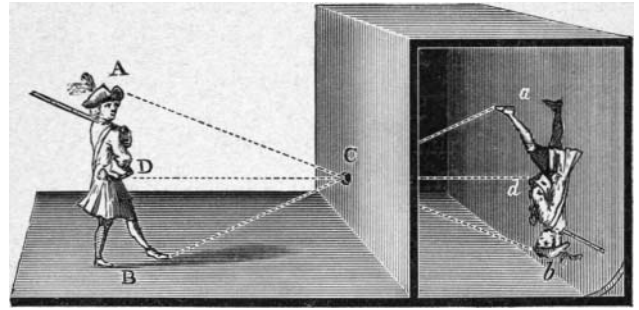
A camera obscuráról (1. ábra) fennmaradt legrégebb feljegyzések csaknem 2500 évesek. A sötét szobába bevetített kép látványa a szemlélt technológiailag nem épp ingerszegény korunkban is joggal lenyűgözi, pedig ennél egyszerűbb optikai eszközt aligha lehet elképzelni. Mindössze egy ablaktalan helyiség és az egyik falba fúrt apró lyuk kell hozzá. Mivel a sötét szobának csupán az a szerepe, hogy a környező szórt fényt kitakarja a bevetített halvány kép elől, nem is feltétlenül van rá szükség: ha nem az utcán játszódó jeleneteket, hanem egy erős fényforrás, például a Nap képét akarjuk kivetíteni, akkor a kép elég intenzív lesz ahhoz, hogy elsötétítés nélkül is lássuk. Ilyenkor akár egyetlen kartonlapba vágott kis lyuk (ez a camera obscura végtelékig letisztult formájának tekinthető) is elég a megfigyeléshez. Az ernyő szerepét pedig a járda aszfaltja vagy egy ház fala is betöltheti.

A lyuk nem tökéletes leképező eszköz. Minél pontosabb, annál élesebb képet alkot, viszont ilyenkor a kép fényereje – ami a lyuk területével arányos – is nullához tart. Fényesebb képhez nagyobb lyukméret kell, ami viszont a kép elmosódottságához vezet. Ezt a jelenséget a 2. ábra szemlélteti. A szabálytalan alakú lyuk minden egyes pontja külön ideális lyukkameraként működik, és létrehozza a fényforrás tökéletesen éles képét, a megfelelő pozícióba eltolva. Inkoherens fényforrás esetén (mint amilyen a Nap) az ernyőn látható eredő fényintenzitás-eloszlás az egyes eltolt éles képek intenzitáseloszlásának összege, ahol az egyes éles képek eltolási pozíciói összességében a lyuk alakjának megfelelő területet fedik le. Az ernyőn egy olyan elmosódott képet látunk tehát, amely a lyuk alakját és a fényforrás alakját egyaránt „magában hordozza”. A fentieket matematikai nyelven megfogalmazva: az ernyőkép a lyuk alakjának és a fényforrás térbeli intenzitáseloszlásának a *konvolúciójaként* számolható:

$$e(x, y) \propto \iint I(X, Y) f(x-X, y-Y) dX dY, \quad (1)$$

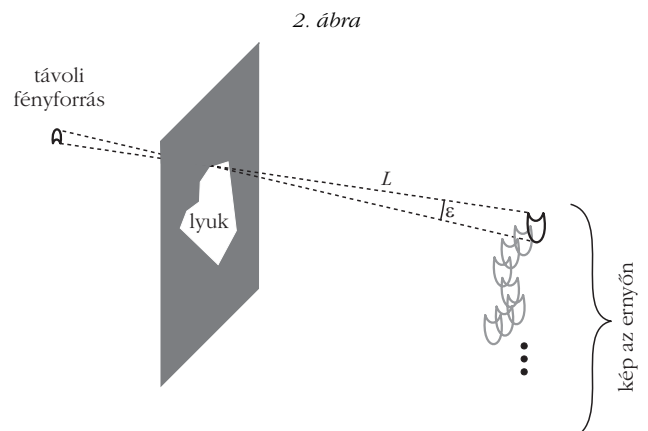
ahol  $e(x, y)$  az ernyő adott  $(x, y)$  koordinátájú pontjában adódó fényintenzitás,  $I(x, y)$  a lyuk alakját leíró függvény –  $I(x, y) = 1$  a lyuk területén belül és 0 azon kívül –  $f(x, y)$  pedig a fényforrás tökéletesen éles képének intenzitáseloszlása az ernyőn. Ha például a – homogén intenzitással sugárzó – Napkorong képét akarjuk az ernyőre kivetíteni, akkor  $f(x, y)$  egy origó középpontú,  $D_{\text{forrás}}$  átmérőjű körön belül 1, azon kívül 0 értéket vesz fel.

A számítás kulcsmozzanata, hogy az  $f(x, y)$  függvény méretskáláját a lyuknak az ernyőtől való  $L$  távolsága határozza meg, hiszen ettől a távolságtól függ a pontszerű lyuk által alkotott kép mérete. A fenti példában  $D_{\text{forrás}} = L\varepsilon$ , ahol  $\varepsilon \approx 0,0093$  radián a Nap látszó szögátmérője.



1. ábra

A  $D_{\text{forrás}}$  jelölést nem kör alakú fényforrás esetén is érdemes megtartani az  $f(x, y)$  függvény karakterisztikus méretére, az  $\varepsilon$ -t pedig a fényforrás karakterisztikus szögkiterjedésére. Ekkor a  $D_{\text{forrás}} = L\varepsilon$  kifejezés továbbra is igaz. (Az  $L$  és  $\varepsilon$  mennyiségek jelentése a 2. ábrán is leolvasható.) Hasonlóképpen, az  $I(x, y)$  függvény karakterisztikus méretét is leírhatjuk egyetlen  $D_{\text{lyuk}}$  számmal (például kör alakú lyuknál ez a lyuk átmérője, négyzet alakú lyuknál a lyuk oldalhosszúsága stb.). Az (1) konvolúciós összefüggés lényeges tulajdonsága, hogy az eredményül kapott  $e(x, y)$  kép az integrál belsőjében levő két függvény,  $I(x, y)$  és  $f(x, y)$  közül annak a látványát adja vissza inkább, amelyik a kettőjük közül a nagyobb területet foglalja el az  $(x, y)$  síkon. Ha az  $I(x, y)$  jóval nagyobb területre terjed ki, mint az  $f(x, y)$  – azaz, ha  $D_{\text{lyuk}} \gg D_{\text{forrás}}$  –, akkor az ernyőn a lyuk alakját látjuk körvonalazódni. Ha  $D_{\text{lyuk}} \ll D_{\text{forrás}}$ , akkor a fényforrás képe rajzolódik ki az ernyőn. Képzeljünk el, hogy a kiinduló helyzetben az ernyőt közvetlenül a lyuk mögé helyezzük. Ekkor a lyuk alakjának árnyékát, éles sziluettjét látjuk megjelenni az ernyőn. Ez a fentiek alapján érthető, hiszen ekkor  $D_{\text{forrás}} = L\varepsilon \ll D_{\text{lyuk}}$ . Ha most folyamatosan távolítjuk a lyuktól az ernyőt, akkor  $D_{\text{forrás}}$  egyre növekszik, és a keletkező képen csak egyre elmosódottabban kivehető a lyuk alakja, majd a kép homályosan a fényforrás körvonalát kezdi kirajzolni, végül – amikor már az  $L \gg D_{\text{lyuk}}/\varepsilon$  feltétel teljesül – az ernyőn csak a fényforrás éles képét látjuk, és a lyuk alakjára már szinte semmi sem utal.





lyuk mérete	falra vetített kép ( $L$ : a lyuk és a fal távolsága)				
	$L = 10\text{ cm}$	$L = 20\text{ cm}$	$L = 50\text{ cm}$	$L = 1\text{ m}$	$L = 2\text{ m}$
1 mm					
2 mm					
5 mm					

— 1 cm

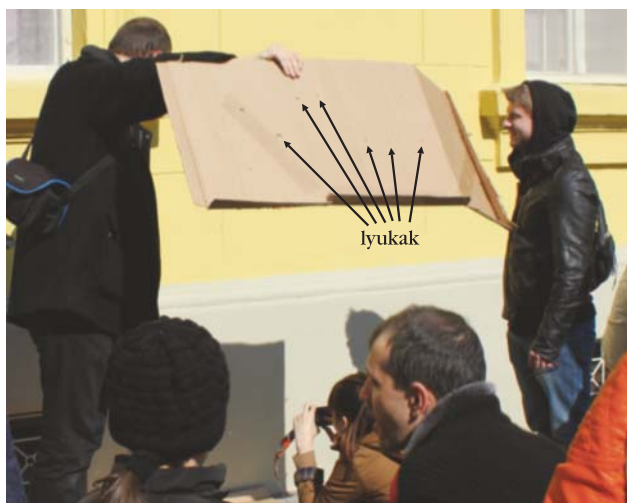
3. ábra

Ennek alapján napfogyatkozás esetén a praktikus módszer a következő: vágjunk egy  $D_{\text{lyuk}}$  méretű lyukat egy kartonpapírba. A kartonlapot olyan távolságra helyezzük el az ernyőtől (például egy ház falától), hogy teljesüljön az  $L \gg D_{\text{lyuk}}/\varepsilon \approx 100 D_{\text{lyuk}}$  feltétel. Ekkor a

4. ábra



5. ábra



Nap képét fogjuk az ernyőn látni, a lyuk alakjától függetlenül. Érdeemes a megfigyelést úgy végezni, hogy az ernyőt folyamatosan távolítjuk a lyuktól, és közben figyeljük, hogyan zajlik le a kép „alakváltozása”  $L \sim D_{\text{lyuk}}/\varepsilon$  távolság környékén. A 3. ábra egy ilyen méréssorozat numerikus szimulációját mutatja, különböző méretű négyzet alakú lyukakat és a napfogyatkozáskor látható Napot, mint fényforrást használva példaként. A jobb oldalon látható az  $f(x, y)$  függvény, azaz a fényforrás éles képe. E függvény  $L$ -től függő megfelelő

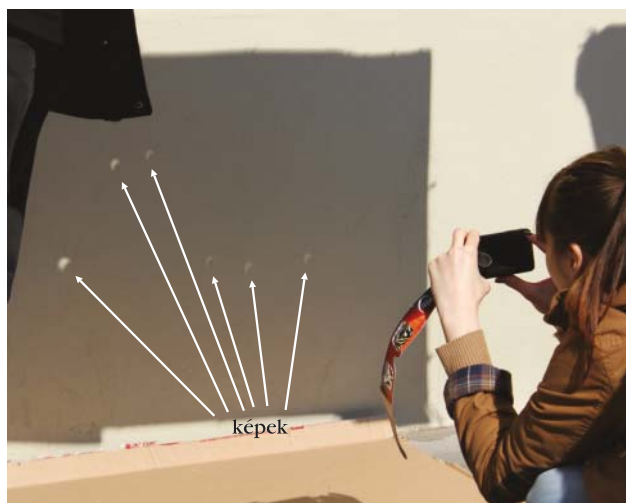


átiskálázása, és az (1) konvolúciós integrálba való behelyettesítése után adódnak a falra vetített képek ábrái. A táblázatban megfigyelhető a kép alakjának átalakulása az  $L \sim 100 D_{\text{lyuk}}$  távolság környékén.

Az intenzitást a 3. ábra számolt képeinek mindegyikén 100%-ra normáltam. A valóságban adott  $L$  ernyőtávolság mellett a kisebb lyukak – a lyuk területével arányosan – gyengébb fényerejű képet szolgáltatnak. A 3. ábra felső sorának képei tehát egy valódi kísérletben 25-ször halványabbak lennének, mint az alsó sor képei.

Egy ilyen valódi kísérletről, a 2015. március 20-i napfogyatkozás megfigyeléséről készültek a 4–6. ábrák fényképei. Egy nagy kartonlapra különböző méretű, szabálytalan lyukakat fűrtünk, amelyek mérete körülbelül 2 mm és 1 cm között változott. A lyukak által alkotott kép a Bakáts téri általános iskola falára vetült. (A kartonlap előkészítésében Bokor Márk kiscsoportos óvoda volt a segítségemre, a napfogyatkozás megfigyelésének megszervezéséért pedig köszönetet mondok a Bakáts téri általános iskola 1.b osztálya pedagógusainak.) A kartonlap és a fal távolsága körülbelül 2 m volt. A 6. ábrán láthatók a különböző lyukak által alkotott

6. ábra



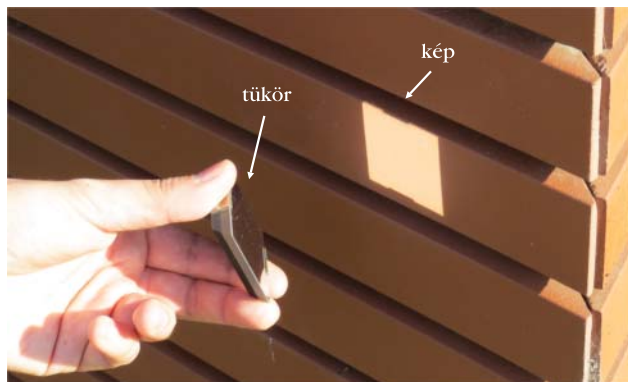


7. ábra

tott – eltérő élességű és fényerejű, de azonos méretű – képek a Hold által részben kitakart Napról.

Lyukkameraként működhet akár egy síktükör is. A tükör körvonalának alakja (a kartonba vágott lyukhoz hasonló módon) tetszőleges lehet. A tükrös módszer előnye az, hogy az egész kísérlet méretskáláját megnöveli: néhány cm-es tükörrel egy 20-30 méterre levő árnyékos falra vetítve a napfényt, a Nap nagy méretű (20-30 cm átmérőjű) kivetített képét figyelhetjük meg. A 7–12. ábrákon egy olyan kísérletsorozat követhető végig, amelyet *Jahn Kornél* kollégámmal (BME) végeztem, nem napfogyatkozáskor, hanem egy átlagos napsütéses áprilisi napon. A kísérlet során egy

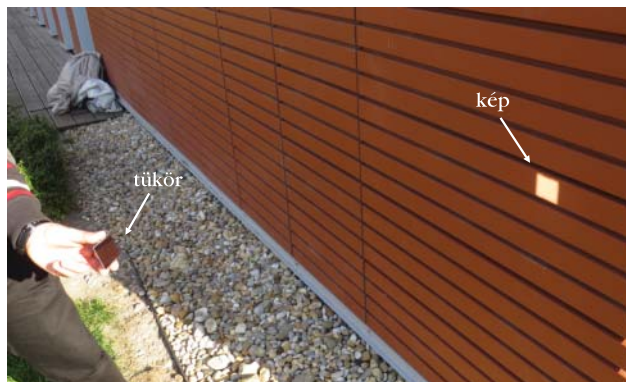
8. ábra



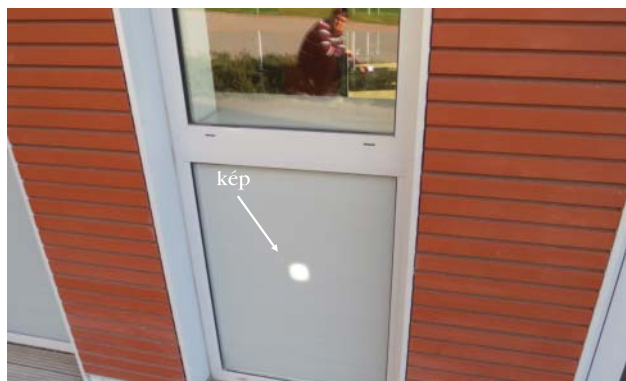
10.a ábra



9. ábra



10.b ábra



4,8 cm × 4,5 cm-es téglalap alakú tükörrel (7. ábra) vetítettük a napfényt a Műegyetem Q épületének falára. A 8–12. ábrákon a tükör és a fal távolsága: ~7-8 cm, ~1 m, ~4-5 m, ~15-20 m, illetve ~30-35 m.

Amint a 10. ábrán látható, – a konvolúciós integrál fent tárgyalt tulajdonságának megfelelően – a kivetített kép itt is  $L \sim 100 D_{\text{lyuk}} (\approx 4-5 \text{ m})$  távolság körül mutatja a tüköralak és a Napkorong alakja közötti átmenetet.

A Napkorong mindig szép látványt nyújt, de különösen érdekes akkor megfigyelni, amikor valamilyen más égitest is beúszik közénk és a Nap közé, és annak egy részét kitakarja. Naprendszerünkben 3 égitest tud közénk és a Nap közé kerülni: a Hold (ekkor van napfogyatkozás), a Vénusz és a Merkúr (az utóbbi két esetben Vénusz-, illetve Merkúr-átvonulásról beszélünk).

A Vénusz-átvonulások megfigyelésének története a tudománytörténet legebilincselőbb fejezetei közé tartozik. Szinte bizonyos, hogy a 17. század előtt egyetlen ember sem látott ilyen jelenséget, aminek a fő oka az, hogy ezeket nehéz volt pontosan megjósolni. Napra pontos előrejelzésükhöz *Kepler* matematikai tudása és *Tycho Brahe* korábbi, precíz megfigyelései kellek. Sajnos Kepler maga sohasem részesülhetett a szép látványban. Az 1631-es átvonulást megjósolta ugyan, de 1630-ban meghalt. (Ráadásul kortársai is lemaradtak a jelenségről, mert az Európából nem látszódtott.) Az első eset, hogy valaki megfigyelhette a Nap elé bekúszó Vénusz alakját, 1639-ben történt. A fennmaradt dokumentumok szerint ekkor is mindössze ketten, a 21 éves *Jeremiah Horrocks* és barátja, *William Crabtree* látták a jelenséget. Mindketten táv-



11.a ábra



11.b ábra



12.a ábra

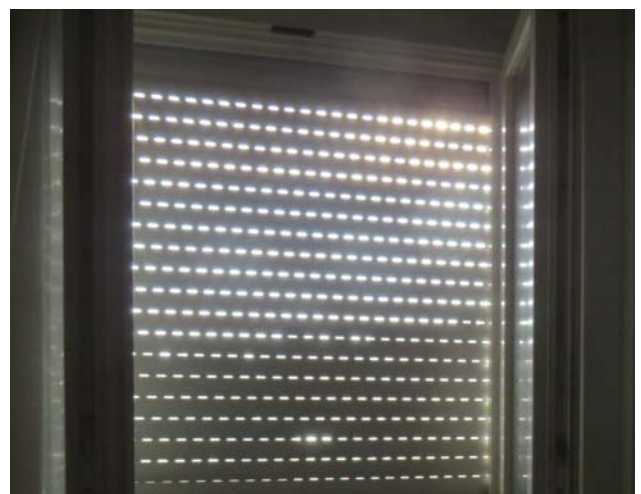


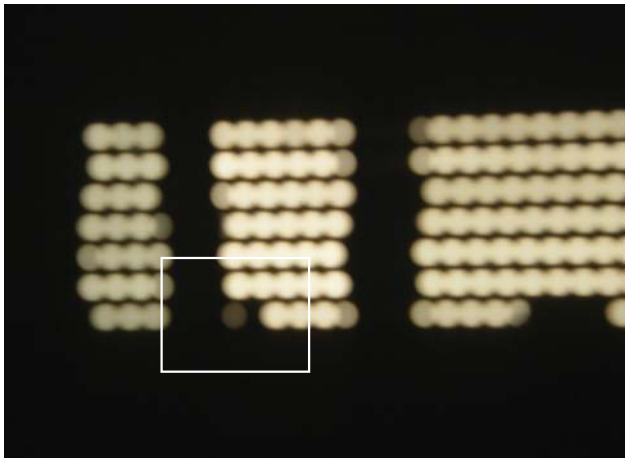
12.b ábra

csővel vetítették ki a Nap képét egy ernyőre. (Azt hihetnénk, hogy a távcső 1608-as feltalálása előtt amúgy is esélytelen lett volna a megfigyelés, hiszen a Nap előtt elhaladó Vénusz parányi korongja legfeljebb távcsővel kivethető. Mint azonban alább látni fogjuk, lyukkamerával is sikeresen elvégezhető a kísérlet.) Különösen izgalmasak a következő, 1761-es és 1769-es Vénusz-átvonulásokhoz kapcsolódó történetek. Elsőként *Edmund Halley* említendő, aki a 17. század végén zseniális módszert írt le arra, hogy a Vénusz napárnyékba való belépésének és kilépésének másodperc pontos méréséből hogyan lehet a Nap–Föld-távolságot meghatározni. Nagy hatású felhívásban buzdította az utókort, hogy az 1761-es és 1769-es átvonuláskor a nagy cél érdekében minél több helyre szervezzenek megfigyelő expedíciókat – jól tudva, hogy az ő életéből ez az égi jelenség sajnos kimarad. A Vénusz-átvonulások ugyanis sajátos periodicitást mutatnak (8, 105,5, 8, 121,5 stb. évenként követik egymást), és Halley pontosan egy 121,5 éves „üresjáratnak” viszonylag az elején, 1656-ban született. Az utókort azonban megfogadta tanácsát, és a két 18. századi Vénusz-átvonulás részletes megfigyelésére számos expedíció indult a Föld különböző pontjaira. Nevezetes többek között *Mihail Lomonoszov* (1761, Szentpétervár), *James Cook* kapitány (1769, Tahiti) és a *Hell Miksa–Sajnovics János* páros (1769, Valdö) Vénusz-megfigyelése. A tudományos összefogás sok fontos eredményhez vezetett. Addig elképzelhetetlen pontossággal sikerült a Nap–Föld-távolságot meghatározni; Lomonoszov – a Nap elé belépő Vénusz megre-

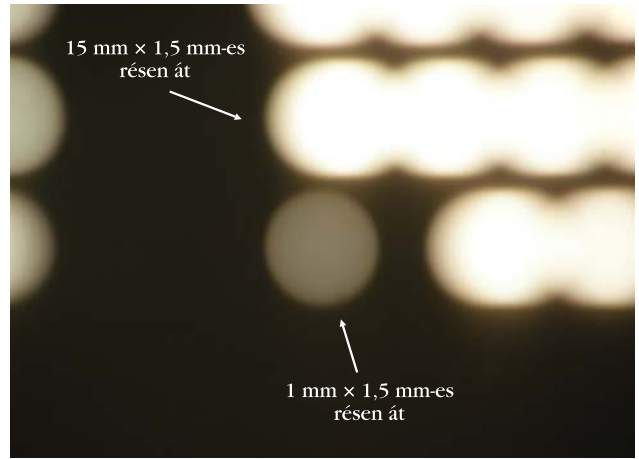
megő körvonalának látványából vonva le a következtetést – felfedezte, hogy a Vénusznak légköre van; Sajnovics János pedig több hónapos lappföldi tartózkodása alatt feltárta a lapp és magyar nyelv rokonságát, és a Vénusz-expedícióról visszatérve megírta a finnugor nyelvrokonság tudományos elméletét útnak indító *Demonstratio. Idioma ungarorum et lapporum idem esse* című művét. Újabb 105,5 éves üresjárat után következett az 1874-es Vénusz-átvonulás, amely filmtörténeti jelentőséggel bír. *Pierre Janssen* francia csillagász, akinek a hélium felfedezésében is döntő érdemei voltak, 1873-ban találta fel a mozikamera őseinek

13. ábra





14.a ábra

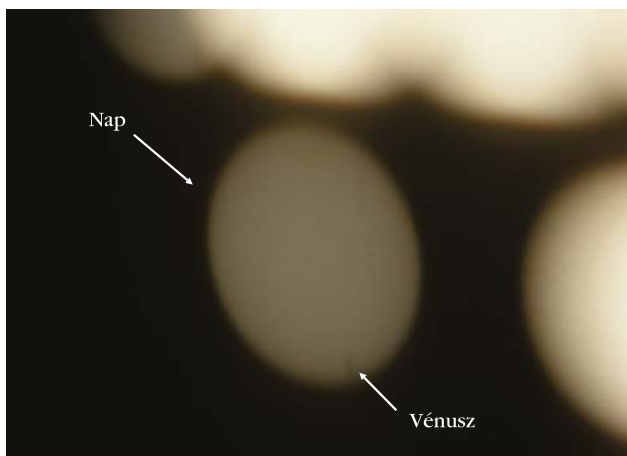


14.b ábra

tekinthető fotográf-revolvert, amellyel gyors egymásutánban sorozatfelvételeket tudott készíteni. E zseniális találmánynak és Janssen utazókedvének köszönhető, hogy ma mozgóképen csodálhatjuk meg, milyen látványt nyújtott a Nap elé bekúszó Vénusz 1874-ben, Nagaszakiból megfigyelve. (Janssen egyébként főszerepet játszik – a kongresszus elnökeként magát alakítja – *A fotográfiai kongresszus megérkezik Lyonba* című rövidke filmben, amelyet a Lumière-fivérek 1895-ben, a mozi „hivatalos” születési évében forgattak, és vetítették le az ámuló lyoni publikumnak.)

A legutóbbi, 2012. június 6-i Vénusz-átvonulás Magyarországról is látható volt. Ekkor készültek a 14–16. ábrákon látható fényképek. Hálósobánk keleti fekvésű, így a félig felhúzott redőny (13. ábra) résein át aznap reggel is bevilágított a Nap. A rések  $15\text{ mm} \times 1,5\text{ mm}$  méretűek, és a szemközti falra – amely  $3,75\text{ m}$ -re van a redőnytől – a Nap megsokszorozott képét vetítették (14.a ábra). A fal 14.a ábrán fehér téglalappal jelölt részlete közletről lefényképezve a 14.b ábrán látható. E fénykép közepén a Nap halványabb, de élesebb képe látszik. Ezt úgy kaptam, hogy az egyik redőnyrés szélességének nagy részét kitakarom, így a fény ott csak egy körülbelül  $1\text{ mm} \times 1,5\text{ mm}$  méretű résen tudott áthaladni. Ezt az élesebb képet közelebről szemügyre véve (15. ábra) öröm-

15. ábra

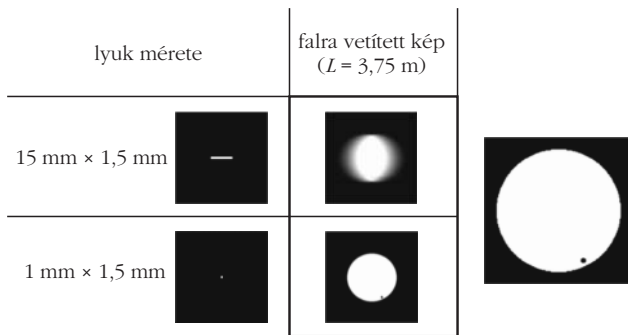


mel fedeztem fel, hogy a körülbelül  $3,5\text{ cm}$  átmérőjű Napkorong jobb alsó részénél egyértelműen kivehető a Vénusz apró, sötétebb foltja. Itt tehát a lesötétített hálószoba az 1. ábrához hasonló klasszikus camera obscuraként viselkedett. Igaz ugyan, hogy nem egyetlen lyuk vetítette be a külvilágot, hanem a redőny széles résein át behatoló napfény is a falra vetült, de ez utóbbiak együttes hatása sem volt olyan erős, hogy a lényeges látványt elmossa. Összehasonlításként, a 16. ábra fényképe azt mutatja, hogy néhány perccel a hálósobában készült felvétel után milyen látványt mutatott a Vénusz egy teodolit távcsövével kivetítve. A távcsővel kivetített kép sokkal élesebb és kontrasztosabb a hálósobában készülnél, de összességében megállapíthatjuk, hogy a Vénusz átvonulása lyukkamerával is megfigyelhető.

A 17. ábrán a redőnyös kísérlet numerikus szimulációjának eredményeit mutatom be. Ezeket az (1) konvolúciós összefüggéssel számoltam, a kétféle résalakot figyelembe véve. Az  $f(x, y)$  függvényt ismét a jobb oldali ábra mutatja, ahol a Vénuszt jelképező apró kör méretét úgy adtam meg, hogy összeszoroztam a bolygó átvonuláskor mérhető látszó szögátmérőjét ( $\epsilon_{\text{Vénusz}} \approx 3 \cdot 10^{-4}\text{ rad}$ ) és az  $L$  ernyőtávolságot. Ideális leképezésnél az  $f(x, y)$  függvényhez hasonlóan kontrasztos képet kapnánk, azaz a fekete háttér előtt a Nap felülete

16. ábra

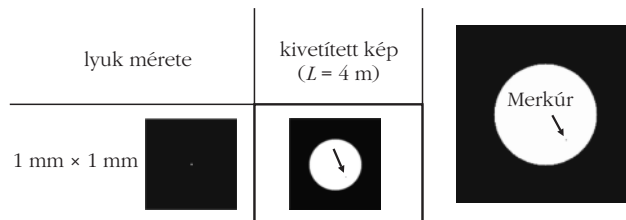




– 1 cm  
17. ábra

fehér, a Vénusz apró körlapja fekete lenne a képen. Az 1 mm × 1,5 mm-es rés által alkotott ernyőképet (a 17. ábra táblázatának jobb alsó képét) elemezve azt kaptam, hogy a Vénuszt jelképező apró, elmosódott folt intenzitásmaximuma 25%-a a Napkorong intenzitásának, azaz nem fekete, hanem sötétszürke. A lyuk által alkotott kép a Vénusz esetében tehát nem volt tökéletesen kontrasztos, de azért jól ki lehetett venni. A konvolúciós integrálból adódó elkerülhetetlen effektus, hogy ha még kisebb objektum kúszik be a Nap elé, akkor a kép kontrasztja még rosszabb lesz. Ilyen típusú látványnál tehát elsősorban a rossz kontraszt szab korlátot a lyukkamerás megfigyeléseknek, amint azt a Merkúr példáján mindjárt látni fogjuk.

A Merkúr-átvonulások jóval gyakoribbak, mint a Vénusz Nap előtti elhaladásai (a legközelebbi 2016. május 9-én lesz), és éppen ebből a gyakoriságból ered legfőbb tudománytörténeti jelentőségük. A Merkúr pozíciója ugyanis ilyen átvonulások alkalmával mérhető a legpontosabban. A viszonylag gyakori átvonulások elegendő mérési adatot szolgáltatottak a 19. században a zseniális *Le Verrier*-nek, hogy a Merkúr perihéliumelfordulását rendkívüli pontossággal kiszámolja. Így derült fény arra a kicsiny,  $\sim 43^\circ$ /évszázad mértékű elfor-



– 1 cm  
18. ábra

dulásjárulékra, amely *Einstein* általános relativitáselméletének megjelenéséig várt az elméleti magyarázatra.

Megfigyelhető-e a Merkúr-átvonulások lyukkamerával? Ez a bolygó kisebb, és távolabb is van tőlünk, mint a Vénusz, így a látszó szögátmérője még akkor is nagyon kicsi ( $\epsilon_{\text{Merkúr}} \approx 5 \cdot 10^{-5}$  rad), amikor a legközelebb van a Földhöz (mint például Merkúr-átvonuláskor). A 18. ábra jobb oldali képe mutatja, milyen látványt nyújt a Nap elé bekészülő Merkúr apró, szinte pontszerű korongja, tökéletes leképezés esetén. Ebből az  $f(x, y)$  függvényből – 1 mm × 1 mm-es négyzet alakú lyukat és 4 m-es ernyőtávolságot feltételezve – az (1) konvolúciós integrál a 18. ábrán látható képet szolgáltatja. A kiszámolt ernyőképen fekete nyíllal jelzem a Merkúr nagyon világos szürke, ezért gyakorlatilag kivehetetlen képének helyét. A képet elemezve kiderül, hogy az ernyőn a Merkúr foltjának intenzitása 94%, azaz a fehér háttértől alig megkülönböztethető. Megállapítható tehát, hogy – bár mindenképpen érdekes a 2016-os Merkúr-átvonulást figyelemmel követni, és közben a téridő görbültségén elmélkedni – erre a megfigyelésre sajnos a lyukkamera nem látszik alkalmasnak. Távcsővel kivetítve azonban továbbra is kontrasztos képet kaphatunk, mint azt az interneten fellelhető, korábbi Merkúr-átvonulásokról készült fényképek tanúsítják. Kartonpapíros-lyukkamerás kísérleteinket pedig folytathatjuk a 2022. október 25-i napfogyatkozáskor.

## A ZSONGLÓRKÖDÉS FIZIKÁJA

Varga János  
Székesfehérvár

Mottó: „Meggyőződés, hogy a tudomány szakmákra, szakterületekre való felosztása az osztályozó emberi elme ugyan szükségszerű, de mesterséges terméke. A természet nem ismeri az ilyen szakosítást.”

Szalay Sándor

A matematika csupán számokkal való zsonglőrködés, a fizika képletekkel való bűvészkedés, a kémia meg csak kémcsövekben való kotyvasztás – hangoztatják a gondolkodni restek. E mondás a zsonglőrködést a matematikához köti. Amennyiben néhány összeadás és kivonás maga a matematika, annyiban ezt a felfogást erősíti az alábbi [1]-ből vett feladat és annak megoldása is.

F.60. *Jani és Juliska édesapja szomorúan bandukolt haza, ugyanis nem tudott venni egyebet, mint*

*két darab tojást. Egy olyan régi fahídhöz ért, amelyre ki volt írva, hogy 70 kg-nál nagyobb tömeget nem bír el. Elgondolkozott a jó öreg:*

– *Én pontosan 69,950 kg tömegű vagyok, a tojások meg egyenként 50 g tömegűek. Még ezt a két tojást sem tudom épségben hazavinni gyermekeimnek – búslakodott szomorúan.*

*Hamarosan azonban mentő ötlete támadt, és épen hazavitte a két tojást anélkül, hogy a híd leszakadt volna. Pontosán egyszer baladt át a hídon, és senki sem segített neki. Vajon hogy tette ezt?*

Az egyik fizikaórán tanítványaimnak én is feladtam a fenti példát, mert alkalmasnak találtam az önálló tanulói kutatásra, számolásra és mérésre, amin az egész osztály együtt gondolkozhat és dolgozhat,

arra, hogy tanárként „felülről nézve és a háttérből irányítva” figyelhessem tanítványaim munkáját, ki hogyan közelíti meg a problémát, milyen gondolkodásmódot alkalmaz. Én magam csupán, mint moderátor próbáltam közreműködni, a „brain storming” (ötlet-roham) módszert alkalmazva.

## Ötletek a józan ész jegyében

Mintegy megérezve a feladatban lévő játékosságot, tanítványaim először a mindennapi logikát használták. Szinte záporoztak az ötletesebbnél ötletesebb javaslatok. Volt, aki azt javasolta, hogy az apa vágjon le a hajából annyit, mint a két tojás tömege, mások valamilyen ruhadarabtól – például kabát stb. – akarták megszabadítani, vagy azt javasolták, hogy dobja át a folyón a cipőit, és mivel azok biztosan nehezebbek, mint egy tojás, így meztőláb a két tojással a híd leszakadásának veszélye nélkül könnyedén át tud menni a hídon. Bár a feladat eredeti kiírása nem tartalmaz a híd teherbíró képességénél több megkötést, közösen megegyeztünk, hogy noha ezek nem túl rossz javaslatok, próbáljuk egy kicsit körültekintőbben vizsgálni a feladatot.

## Számolásos megközelítés

Ez nyilvánvalóan nem egy absztrakt matematikai probléma, de a matematika segít az áttekinthető megfogalmazásban, a kérdés megválaszolásában. Számoljunk egy kicsit! – próbáltam más útra terelni az osztályt. Ekkor azonnal rájöttek, hogy csak egy tojás lehet nála, és azt át is tudná vinni, utána pedig visszajönne a másikért. Igen ám, de a feladat szerint csak egyszer haladhat át a hídon – ábrándítottam ki a megoldókat. Hát, akkor nincs megoldás – válaszolták kórusban. Hol lehet még a tojás, ha nem az embernél? – próbálkoztam egy sugalmazó kérdéssel. Ekkor valaki rájött, hogy egy tojásnak mindig a levegőben kellene lennie. És ez hogyan lehetséges? – próbáltam továbblendíteni. Ekkor már többen rájöttek, hogy felváltva kell dobálni a tojásokat.

Vagyis közösen felfedeztük a *bivatkozott folyóirat megfjtését*: „Egy kis humorral és az apuka részéről egy kis kezűgyességgel, úgy jár el, mint a cirkuszban: amíg a hídon halad át, felváltva fel-fel dobja (és persze ki is fogja) az egyik tojást (*zsonglőrködik*), így a kezében mindig csak egy 50 g-os tojás van, és a 69,950 kg saját tömegével éppen 70 kg »halad át« a hídon.” [1] Az első olvasásra ötletesnek tűnő megoldáson fellelkesülve azonban ne próbáljunk meg azonnal átmenni a hídon!

Mi lenne, ha most ellenőriznénk a megoldást úgy, mint matekórán, „visszahelyettesítenénk a valóságba”, vagyis az egészet eljátsszanánk két almával, és közben mérnék az almadobáló súlyát? – javasoltam ismét. Irány a szertár és már elő is került egy mérleg. Akinél volt alma az végezte a kísérletet. Először megmértük a

kísérlet végrehajtó tanuló súlyát alma nélkül, majd külön az alma súlyát. Ezt követően jött a kísérlet, és árgus szemekkel figyeltük, hogy mit mutat a mérleg miközben dobja az almát. A váratlan eredmény mindenkit megdöbbentett, mert a mérleg 4 kg-mal mutatott többet. Ez pedig nyilvánvalóan több mint egy alma súlyának megfelelő tömeg. Ezt többször is megismételtük, mert többen nem akarták elhinni.

## Fizikai megközelítés

Többen megjegyezték, hogy a mozgás miatt van az egész, hogy itt most van *tömeg* (alma), *erő* (amivel az almát feldobjuk), akkor a jó öreg *Newton* szerint kell, hogy legyen gyorsulás is. Vagyis ez már a fizika területe és ebben a feladatban – nyilván a megoldásban is – bőven van fizika, használhatjuk a fizikai gondolkodásmódot.

Ezután következett a feldobás fázisainak közös elemzése, majd az egyenletek felírása, azok megoldása, ahol bizony elkelt egy kis tanári segítség. Összeségében az alábbi megoldásra jutottunk.

Jancsi és Juliska édesapja nem vette figyelembe a természet (jelen esetben a fizika) törvényeit, ezért ha a fent leírt megoldás szerint jár el, akkor bizony a híd azonnal leszakad alatta. Miért?

Ahhoz, hogy az apa a tojást függőlegesen feldobja, azt fel kell gyorsítani valamilyen sebességre. Ehhez függőleges, felfelé irányuló „tolóerő” kell kifejtenie. A *hatás-ellenhatás törvénye* miatt az erők mindig párosával lépnek fel, így ugyanilyen nagyságú, de ellentétes (lefelé irányuló) erő is keletkezni fog, ami a kézre hat, így ennyivel megnövekszik az apa súlya, de mivel a híd semmilyen többletterhelést nem bír el, természetesen le fog szakadni.

Vizsgáljuk meg, hogy mennyivel növekszik a súlyunk, miközben feldobjuk a kezünkben lévő tojást vagy bármilyen tárgyat!

Az *1. ábra* a tojásfeldobás fázisait mutatja, ahol  $F$  a tojásra kifejtett „tolóerő”,  $G_t$  a tojás/test súlya (pontosan: a tojásra ható nehézségi erő),  $s_{gy}$  a tojás gyorsítási/lassítási úthossza (ezalatt hat rá az  $F$  erő),  $s_e$  a tojás emelkedési/esési úthossza (a gyorsítás megszűntének pozíciójától számítva).

A *szabadesés törvényei* alapján az  $s_e$  magasságból elejtett test esetén

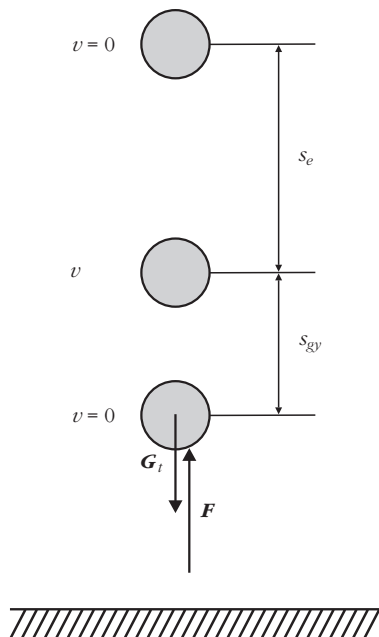
$$s_e = \frac{gt^2}{2}, \quad (1)$$

illetve

$$v = gt, \quad (2)$$

ahol  $t$  a repülés/zuhanás ideje. A (2) egyenletről  $t$ -t kifejezve és (1)-be behelyettesítve, majd az egyenletet rendezve

$$2gs_e = v^2. \quad (3)$$



1. ábra. A tojásfeldobás fázisai.

A munkatétel alapján a gyorsítási szakaszra viszont írható, hogy az  $F_{gy}$  gyorsító erő munkája egyenlő a mozgási energia megváltozásával, azaz

$$F_{gy} s_{gy} = \frac{m v^2}{2}. \quad (4)$$

(3)-at (4)-be behelyettesítve, majd  $F_{gy}$ -t kifejezve

$$F_{gy} = \frac{s_e}{s_{gy}} m_t g = \frac{s_e}{s_{gy}} G_t, \quad (5)$$

ahol  $m_t g = G_t$  a feldobott test súlya.

A testet ténylegesen gyorsító erő az eredő erő, a testre kifejtett felfelé mutató  $F$  tolóerő és a test súlya között az alábbi összefüggés áll fenn.

$$F_{gy} = F - G_t. \quad (6)$$

Ebbe (5)-öt behelyettesítve,  $F$ -re az alábbi összefüggés adódik.

$$F = \left( 1 + \frac{s_e}{s_{gy}} \right) G_t. \quad (7)$$

Súlyunk tehát éppen ezzel megegyező értékkel, de az  $F$ -fel ellentétes irányú, lefelé mutató úgynevezett reakció erő nagyságával növekszik. A  $\Delta G$  súlynövekedés tehát a feldobott test súlyának ( $s_e/s_{gy}$ )-szeresével egyenlő.

$$G_t + \Delta G = \left( 1 + \frac{s_e}{s_{gy}} \right) G_t. \quad (8)$$

Így a zsonglörködés egy új, eddig nem publikált általános összefüggéséhez jutottunk, és közösen örültünk az új felfedezésnek.

Természetesen a test elkapásakor ugyanakkora lesz a súlynövekedésünk, feltéve, ha az esési, illetve lassítási úthosszak megegyeznek az emelkedési, illetve gyorsítási úthosszakkal.

Ezt követően az osztály egyik zsonglörködni tudó tanulója segítségével – a tanárnak is jól jön néha egy kis tanulói segítség! – tojás helyett almával végeztünk kísérletet, erről videófelvételt készítve, majd a videót visszajátssza és a távolságokat lemérve, az alma helyett a tojás tömegével számolva az alábbi értékek adódtak:  $s_{gy} = 10$  cm,  $s_e = 40$  cm,  $m_t = 50$  g = 0,05 kg; ekkor

$$G_t = m_t g = 0,05 \cdot 10 = 0,5 \text{ N},$$

$$\Delta G = \frac{40}{10} \cdot 0,5 = 4 \cdot 0,5 = 2 \text{ N}.$$

Így a 69,950 kg tömegű apa eredeti 699,5 N súlya a tojás feldobásakor  $699,5 + 2,5 = 702$  N lesz, ezt a 700 N teherbírású fahíd nem fogja elbírní, így az mindenképpen leszakad. A problémát tovább elemezve rájöttünk, hogy sajnos a helyzet még ennél is rosszabb. Eddig ugyanis figyelmen kívül hagytuk, hogy az alma vagy tojás feldobásakor még az almánál jóval nagyobb tömegű kezünket is gyorsítani kell, ami szintén súlynövekedést okoz – nem véletlenül mutatott 4 kg-mal többet a mérleg az első próbadozásnál. (Pontos számításnál tehát ezt is figyelembe kell venni.)

Így tehát azt gondolhatnánk, hogy az apának csak egyetlen lehetősége marad: dobálás nélkül, egyenként átvinni a tojásokat a hídon, mert így a tömege egy tojással együtt éppen 70 kg, ami megegyezik a híd teherbírásával. Sajnos a fizika megint közbeszól, ugyanis a normál járás közben – és ezt eddig nem is vettük figyelembe! – a tojás és a testünk súlypontja lefelé jár, ráadásul a nem kis tömegű lábainkat is emelgetni (gyorsítani, lassítani) kell, így súlyunk ezek miatt is olyan mértékben megnövekszik, hogy valójában tojás nélkül sem tudnánk átmenni a 70 kg teherbírású hídon.

Ez a feladat tehát jó példa arra, hogy a valóságban (a természetben) a jelenségek nincsenek tudományterületek szerint szétválasztva, ezt csak az emberi elme teszi azért, hogy egy bonyolultabb jelenséget több szempontból vizsgálva könnyebben megértsünk.

A technika és a műszaki tudományok fejlődése napjainkban a fizika mély ismeretét igényli a későbbiekben e területekre kerülő tehetséges tanulóktól, akik a fizikai ismeretanyagot kellő szakértelemmel tudják összekapcsolni a természet- és műszaki tudományok többi területével.

„A zsonglörködés sokak számára csak bohóckodás, amolyan cirkuszi produkció: tányértáncoltatás, röpködő labdák és buzogányok. Története a távoli múltban kezdődött. A legősibb dokumentált emlék közel négyezer éves: egy zsonglörököt ábrázoló egyiptomi sírkamrarajz a Középső Királyság idejéből. James Cook kapitány felfedezései nyomán pedig azt a meglepő tényt jegyezték fel, hogy Tonga szigetén a lányok mindegyike tudott zsonglörködni, esetenként hat labdával is. A matematikus számára persze a

zsonglörködés – mint sok minden a világon – izgalmas matematikai feladvány, nagyon is komoly dolog. Bármily meglepő, a ma ismert zsonglörmutatványok egy részét matematikusok »találták fel«, nem pedig cirkuszi mutatványosok. 1972-ben a Nemzetközi Zsonglörszövetség elnöke az a *Ronald L. Graham* volt, aki a Magyar Tudományos Akadémia Tiszteleti tagja, 1993-ban az Amerikai Matematikai Társulat elnöke, *Erdős Pál* jó barátja, akivel 30 közös publikációjuk jelent meg.” [2]

Mint a [2] cikk – amelynek elolvasását szintén ajánlom – is rámutat, a zsonglörködés a matematikának is komoly vizsgálati/kutatási területe. Ugyanakkor fizikai szempontból is sok érdekeset tudunk mondani

róla, ráadásul fizikaórán egy mérlegre állva, még ha nem is zsonglörködve – mert még két almával sem olyan könnyű zsonglörködni –, de egyszerűen csak egy almát feldobva és elkapva, a fenti megállapításokat egyszerű súlyméréssel igazolhatjuk, ami igen meggyőző lehet a tanulók számára, rávilágítva arra, hogy ezt a tevékenységet még mélyebben vizsgálhatnánk, mint ahogyan a fentiekben tettük.

#### Irodalom

1. *Matlap* 7 (2013. szeptember) Kolozsvár, 257. o., F. 60. feladat
2. Czédli Gábor: A III. Béla Gimnáziumtól az egyszerű zsonglör-minták átlagtételéig. *Szeged*, 2007. január 26. <http://www.math.u-szeged.hu/~czedli/publ.pdf/3.Bela1.pdf>

## LISSAJOUS-GÖRBÉK ELŐÁLLÍTÁSA FERDESZÖGŰ REZGÉSEK EGYMÁSRA TEVŐDÉSÉVEL

Inceffy Szabolcs Zsombor  
Ócsai Bolyai János Gimnázium

### Lissajous-görbék

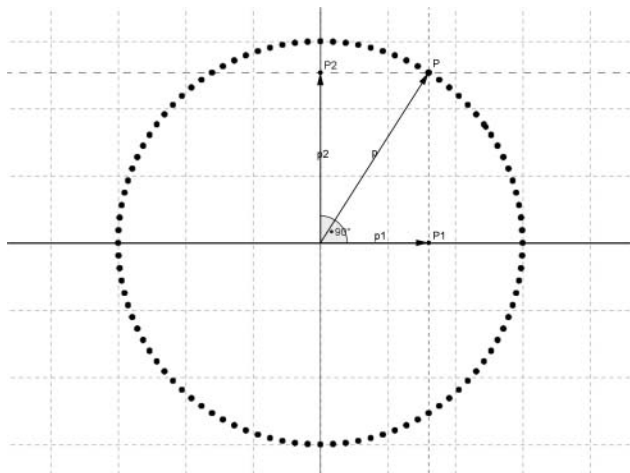
Ismeretes, hogy a Lissajous-görbék merőleges rezgések egymásra tevődéseként jönnek létre. A rezgések amplitúdóját, frekvenciáját, illetve kezdőfázisát változtatva különböző méretű és alakú látványos görbék, alakzatokat kapunk.

A *GeoGebra* (ingyen letölthető) számítógépes program segítségével a Lissajous-görbe a két rezgés egymásra tevődésének nyomvonalaként jön létre.

Az 1. és 2. ábrákon látható  $P$  pont helyzetét meghatározó  $\mathbf{p}$  vektor a  $\mathbf{p}_1$  és a  $\mathbf{p}_2$  vektorok összege. A  $\mathbf{p}_1$  és  $\mathbf{p}_2$  vektorok hosszát és irányítását a

$$p_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 t) = A_1 \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{\pi}{2} + \varphi_1\right)$$

1. ábra.  $f_1:f_2 = 1:1$  rezgésszámarányú Lissajous-görbe.



és a

$$p_2 = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

rezgés (kitérés) egyenletek határozzák meg. Ahol  $A_1$  és  $A_2$  a rezgések legnagyobb kitérését,  $f_1$  és  $f_2$  a rezgésszámokat,  $t$  az időt,  $\varphi_1$  és  $\varphi_2$  a kezdőfázisokat jelölik.

A  $\mathbf{p}$  vektor nagyságát Pitagorasz tételével a

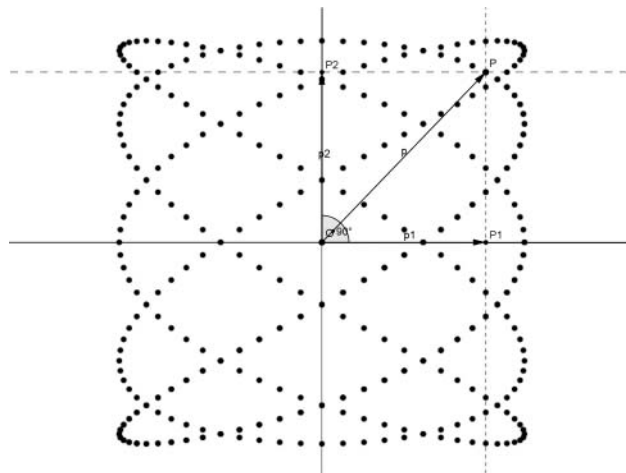
$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$$

összefüggésből számolhatjuk ki, míg irányát a

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

képlettel határozhatjuk meg!

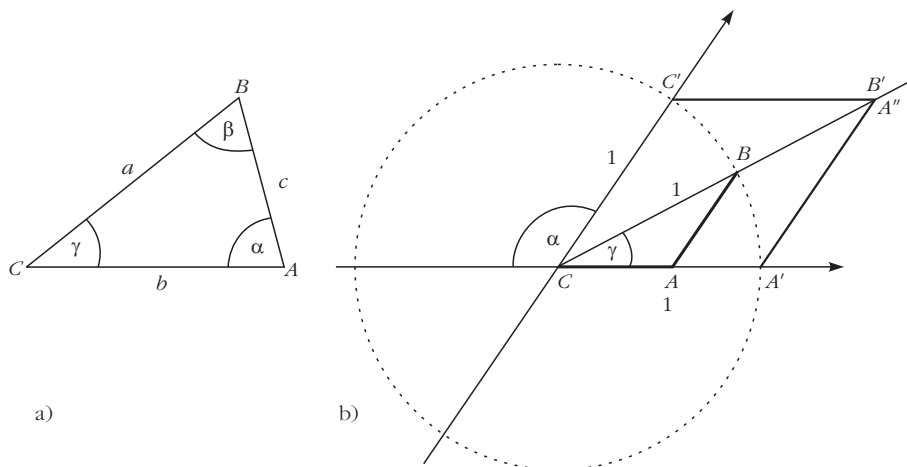
2. ábra.  $f_1:f_2 = 5:3$  rezgésszámarányú Lissajous-görbe.





Sajátos esetben, ha  $A_1 = A_2$ ,  $f_1 = f_2$  és  $\varphi_1 = \varphi_2$ , akkor a nyomvonal egy kör (1. ábra), ha  $A_1 = A_2$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2$  és  $f_1 \neq f_2$ , de a rezgésszámok úgy aránylanak egymáshoz, mint a természetes számok ( $f_1:f_2 = n_1:n_2$ ), akkor a 2. ábrához hasonló görbét kapunk.

A következőkben megvizsgáljuk a Lissajous-görbék előállítását egymással ferde szöget bezáró rezgések összegeként. Ehhez szükségünk lesz az általános háromszögben, illetve a trigonometrikus (egység sugarú) körben értelmezett általános szögfüggvényekre.



3. ábra. a) általános háromszög és b) egység sugarú (trigonometrikus) kör.

$$\operatorname{tg}_\alpha \gamma = \frac{1}{\operatorname{ctg}_\alpha \gamma} = \frac{\sin_\alpha \gamma}{\cos_\alpha \gamma},$$

illetve

$$\begin{aligned} \sin_\alpha \gamma &= \frac{1}{\sin_\gamma \alpha} = \cos_\alpha \beta = \frac{1}{\cos_\gamma \beta} = \\ &= \operatorname{tg}_\beta \gamma = \frac{1}{\operatorname{tg}_\beta \alpha} = \operatorname{ctg}_\beta \alpha = \frac{1}{\operatorname{ctg}_\beta \gamma}. \end{aligned}$$

A szöveget megfelelően felcserélve még öt, a fentiekhez hasonló, összefüggést tudunk felírni.

Az általános szögfüggvények kiszámítása

A szinusz-tétel segítségével könnyen igazolható, hogy

$$\sin_\alpha \gamma = \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha},$$

de ennél több is igaz:

$$\sin_\alpha \gamma = \frac{\sin_\delta \gamma}{\sin_\delta \alpha}.$$

Ez az összefüggés az alapszög változtatását teszi lehetővé. Továbbá igaz, hogy

$$\cos_\alpha \gamma = \sin_\alpha \beta = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin \alpha},$$

$$\operatorname{tg}_\alpha \gamma = \frac{\sin_\alpha \gamma}{\cos_\alpha \gamma} = \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)} \text{ és}$$

$$\operatorname{ctg}_\alpha \gamma = \frac{\sin(\alpha + \gamma)}{\sin \gamma}.$$

A bizonyítások és az általános szögfüggvények egyéb tulajdonságai az irodalomjegyzékben megtalálhatók.

Lássunk egy példát, számítsuk ki a  $\operatorname{tg}_{45^\circ} 45^\circ$  értékét! A fenti összefüggés segítségével:

$$\operatorname{tg}_{45^\circ} 45^\circ = \frac{\sin 45^\circ}{\sin(45^\circ + 45^\circ)} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

## Általános szögfüggvények

Az általános szögfüggvények definíciói

A hagyományos szögfüggvényeket derékszögű háromszögben szokás értelmezni, illetve az egységnyi sugarú kör segítségével az értelmezést tetszőleges (forgás) szögekre is ki lehet terjeszteni.

Felvetődik a kérdés, hogy tovább lehet-e általánosítani a szögfüggvényeket, azaz az általános háromszögben lehet-e általános (alakú) szögfüggvényeket értelmezni? A válasz igen, sőt bizonyos esetekben az általános szögfüggvényeket előnyösebben lehet használni, mint egyéb tételeket, de lássuk miről is van szó!

Az általános háromszögben (3.a ábra), a szokásos jelöléseket használva és az  $\alpha$ -t tekintve alapszögnek, a következő szögfüggvényeket értelmezhetjük:

$$\sin_\alpha \gamma = \frac{c}{a}, \quad \cos_\alpha \gamma = \frac{b}{a},$$

$$\operatorname{tg}_\alpha \gamma = \frac{c}{b}, \quad \operatorname{ctg}_\alpha \gamma = \frac{b}{c},$$

ha  $\alpha + \gamma \neq 0^\circ$ . Természetesen  $\alpha, \beta, \gamma \neq 0^\circ$  vagy  $180^\circ$  és  $\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$ , illetve  $a, b, c \neq 0$ .

Ha  $\alpha = 90^\circ$ , akkor visszajutunk a hagyományos szögfüggvényekhez, például  $\sin_{90^\circ} \gamma = \sin \gamma$ .

Általánosabb definíciókat a trigonometriai (egységnyi sugarú) kör segítségével adhatunk meg: ha  $|CB| = |CA'| = |C'A''| = 1$ , akkor a 3.b ábra szerint (a szakaszok valójában előjeles szakaszok):

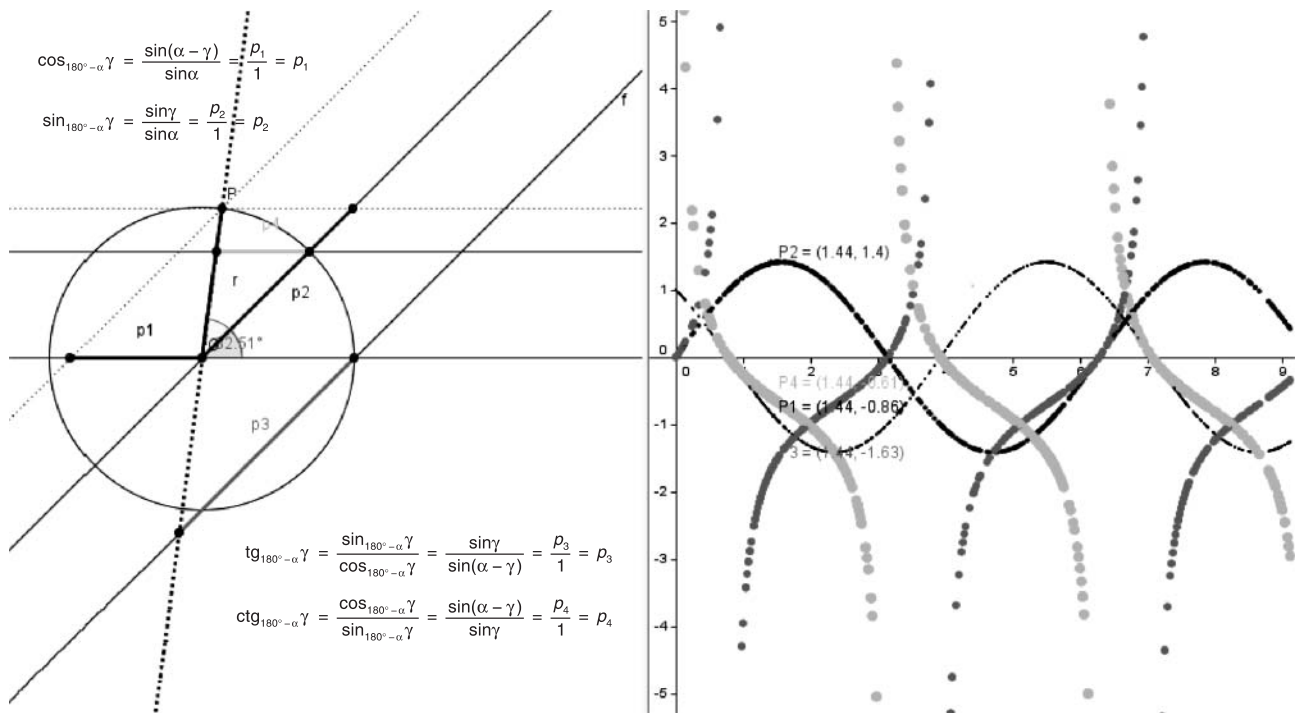
$$\sin_\alpha \gamma = AB, \quad \text{ahol } \alpha \neq k \cdot 180^\circ,$$

$$\cos_\alpha \gamma = CA, \quad \text{ahol } \alpha \neq k \cdot 180^\circ,$$

$$\operatorname{tg}_\alpha \gamma = A'B', \quad \text{ahol } \gamma \neq -\alpha + k \cdot 180^\circ,$$

$$\operatorname{ctg}_\alpha \gamma = C'A'', \quad \text{ahol } \gamma \neq k \cdot 180^\circ \text{ és } k \text{ egész szám.}$$

Egy adott háromszög esetén a definíciók segítségével könnyen bizonyíthatók a következő összefüggések:



4. ábra. Az  $\alpha = 45^\circ$ -os alapszögű szögfüggvények grafikus képei.

A programozható számológépek vagy a számítógépek segítségével könnyen kiszámítható az értelmezési tartományon belüli tetszőleges szög tetszőleges alapú szögfüggvényértéke.

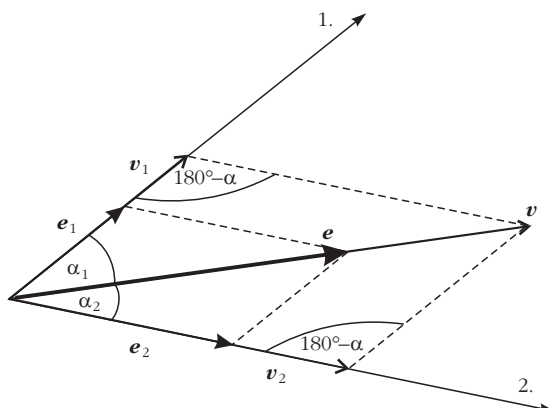
### Grafikus kép

Az általános szögfüggvények grafikus képei hasonlóak a  $90^\circ$ -os alapszögűekéhez, csak az értékhelyek és az értékek mások. Az 4. ábrán az  $\alpha = 45^\circ$ -os alapszögű szögfüggvények grafikus képei nyomvonalként ábrázolva láthatók.

### Alkalmazás

A továbbiakban vizsgáljuk meg az általános szögfüggvények alkalmazását a vektorok ferdeszögű koordináta-rendszerben történő felbontásakor keletkezett kontravariáns koordináták kiszámítására (5. ábra)!

5. ábra. A  $\mathbf{v}$  vektor felbontása két egymással  $\alpha$  szöget bezáró irány szerint.



Az 1., illetve 2. irányokba eső egységvektorok  $\mathbf{u}_1$ , illetve  $\mathbf{u}_2$ , így a  $\mathbf{v}$  vektor irányába eső  $\mathbf{e}$  egységvektor:

$$\mathbf{e} = \cos_{180^\circ - \alpha} \alpha_1 \mathbf{u}_1 + \cos_{180^\circ - \alpha} \alpha_2 \mathbf{u}_2 = \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2,$$

ahol  $\mathbf{e}_1$  és  $\mathbf{e}_2$  az  $\mathbf{e}$  egységvektor 1., illetve 2. irányba eső összetevő vektorai. A  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$ , ahol  $\mathbf{v}_1 = v_1 \mathbf{u}_1$  és  $\mathbf{v}_2 = v_2 \mathbf{u}_2$ . A kontravariáns koordinátákra, pedig a  $v_1 = v \cos_{180^\circ - \alpha} \alpha_1$  és a  $v_2 = v \cos_{180^\circ - \alpha} \alpha_2$  összefüggéseket írhatjuk fel. Könnyen ellenőrizhető, hogy  $\alpha = 90^\circ$  esetben, vagyis derékszögű koordináta-rendszerben, visszakapjuk a szokásos koordinátákat.

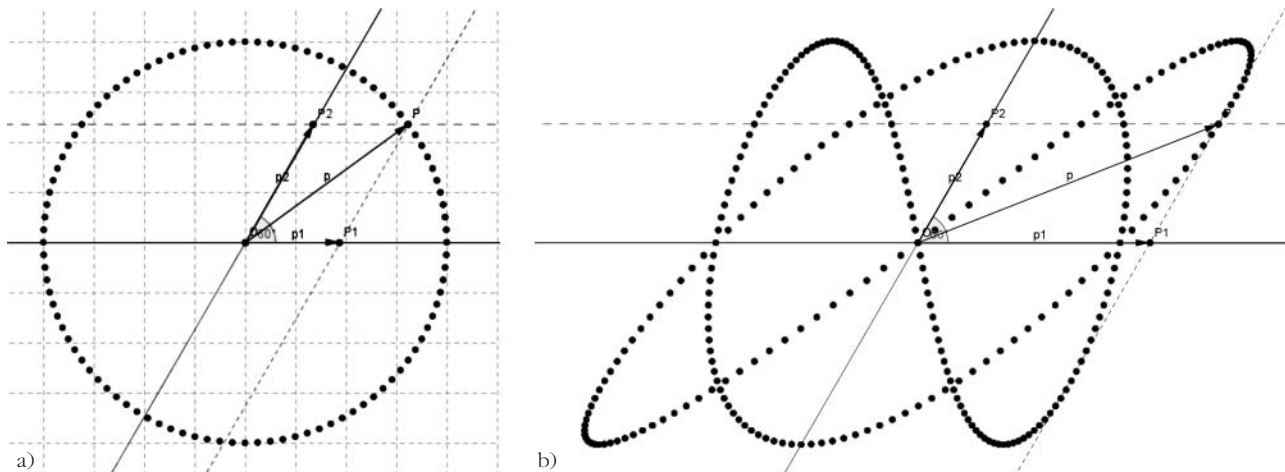
Látható tehát, hogy a kontravariáns koordináták felírása (kiszámítása) olyan egyszerűvé válik, mint derékszögű koordináta-rendszer esetén.

### Lissajous-görbék ferdeszögű koordináta-rendszerben

Az általános szögfüggvények, illetve a GeoGebra utolsó alkalmazásaként vizsgáljuk meg az egymással ferde szöget ( $\alpha \neq 90^\circ$ ) bezáró rezgések egymásra tevődését, amely a Lissajous-görbékhez hasonló görbék előállítását teszi lehetővé!

A  $P$  pont nyomvonalát továbbra is a  $\mathbf{p}_1$  és  $\mathbf{p}_2$  vektorok összege határozza meg. A  $\mathbf{p}_1$  és  $\mathbf{p}_2$  vektorok hosszát és irányát a

$$\begin{aligned}
 p_1 &= A_1 \cos_{\pi - \alpha}(2\pi f_1 t + \varphi_1) = \\
 &= A_1 \frac{\sin(2\pi f_1 t + \pi - \alpha + \varphi_1)}{\sin(\pi - \alpha)} = \\
 &= A'_1 \sin(2\pi f_1 t + \pi - \alpha + \varphi_1),
 \end{aligned}$$



6. ábra. a) az  $f_1:f_2 = 1:1$  és b) az  $f_1:f_2 = 2:3$  rezgésszámarányú Lissajous-görbéhez hasonló görbe.

valamint a

$$p_2 = A_2 \sin_{\pi-\alpha}(2\pi f_2 t + \varphi_2) =$$

$$= A_2 \frac{\sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)}{\sin(\pi - \alpha)} = A'_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2)$$

rezgés (kitérés) egyenletek határozzák meg, ahol az

$$A'_1 = \frac{A_1}{\sin(\pi - \alpha)} \text{ és az } A'_2 = \frac{A_2}{\sin(\pi - \alpha)}$$

a legnagyobb kitérések. A  $p$  vektor nagyságát a koszinusz-tétel (általános Pitagorasz-tétel) segítségével, a

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 - 2 p_1 p_2 \cos \alpha}$$

összefüggésből számolhatjuk ki, míg a vektor irányát a

$$\operatorname{tg}_{\pi-\alpha} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\sin(\alpha - \varphi)} = \frac{p_2}{p_1}$$

képletből (egyenletből) határozhatjuk meg.

Sajátos esetben, ha  $A_1 = A_2$ ,  $f_1 = f_2$  és  $\varphi_1 = \varphi_2$ , akkor a nyomvonal egy kör (1. ábra), ha  $A_1 = A_2$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2$  és  $f_1 \neq f_2$ , de a rezgésszámok úgy aránylanak egymáshoz, mint a természetes számok ( $f_1:f_2 = n_1:n_2$ ), akkor a 2. ábrához hasonló görbét kapunk (6.a és 6.b ábra).

#### Irodalom

1. Budó Á.: *Kísérleti fizika II.*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
2. Inczeffy Sz.: *A trigonometrikus függvények általános alakjai. A matematika tanítása 3/3* (1995).
3. Inczeffy Sz.: *A GeoGebra számítógépes program felhasználása, Lissajous-görbék előállítására derékszögű, illetve ferdeszögű rezgések egymásra tevődéseként.* Műhelyvezetés az 58. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatón, Hévíz, 2015.

## HÍREK – ESEMÉNYEK

### A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

#### Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat közhasznúsági jelentése a 2014. évről

A Fővárosi Bíróság 1999. április 26-án kelt 13. Pk. 60451/1989/13. sz. végzésével a 396. sorszám alatt nyilvántartásba vett Eötvös Loránd Fizikai Társulatot közhasznú szervezetnek minősítette. A Társulat önálló jogi személy, amely az egyesülési jogról, a közhasznú jogállásról, valamint a civil szervezetek működéséről és támogatásáról szóló 2011. évi CLXXV. törvény („Civil törvény”) keretei között közhasznú civil szervezetként működik. A Fővárosi Törvényszék 2015. április 28-án kelt 13. Pk. 60451/1989/49. sz. végzésével megerősítette a Társulat közhasznú jogállását. Ez a közhasznúsági jelentés az említett jogszabály előírásainak figyelembevételével készült.

#### I. rész – Gazdálkodási és számviteli beszámoló Mérleg és eredmény-kimutatás

A Társulat 2014. évi gazdálkodásáról számot adó mérleget jelen közhasznúsági jelentés 1. sz. melléklete tartalmazza. A 2. sz. mellékletként csatolt eredmény-kimutatás szerinti 107 444 Ft tárgyévi eredmény a mérlegben tőkeváltozásként kerül átvezetésre. (A 2014. évi teljes bevétel: 41 857 508 Ft, összes kiadás: 41 750 064 Ft.) A 3. sz. melléklet tartalmazza a közhasznú jogállás megállapításához szükséges mutatókat. A mellékletekben szereplő adatokat *Pusztainé Holczer Magdolna* bejegyzett mérlegképes könyvelő állította össze.

## A 2014. év mérlege

Megnevezés	előző év (eFt)	tárgyév (eFt)
<b>ESZKÖZÖK (AKTÍVÁK)</b>		
<i>A. Befektetett eszközök</i>	115	451
Immateriális javak	16	41
Tárgyi eszközök	99	410
Befektetett pánzügyi eszközöl	0	0
<i>B. Forgóeszközök</i>	11 746	8 544
Készletek	0	952
Követelések	2923	1 248
Értékpapírok	0	0
Pénzeszközök	8823	6 344
<i>C. Aktív időbeli elhatárolások</i>	300	2 800
<b>ESZKÖZÖK (AKTÍVÁK) ÖSSZESEN</b>	<b>12 161</b>	<b>11 795</b>
<b>FORRÁSOK (PASSZÍVÁK)</b>		
<i>D. Saját tőke</i>	5 394	5 501
Induló tőke (1989)	7 581	7 581
Tőkeváltozás	-3 689	-2 187
Lekötött tartalék	0	0
Értékelési tartalék	0	0
Tárgyévi eredmény alaptevékenységből	-454	-1 668
Tárgyévi eredmény vállalkozási tevékenységből	1 956	1 775
<i>E. Céltartalékok</i>	0	0
<i>F. Kötelezettségek</i>	2 802	1 927
I. Hátrasorolt kötelezettségek	0	0
II. Hosszú lejáratú kötelezettségek	0	0
III. Rövid lejáratú kötelezettségek	2 802	1 927
<i>G. Passzív időbeli elhatárolások</i>	3 965	4 367
<b>FORRÁSOK (PASSZÍVÁK) ÖSSZESEN</b>	<b>12 161</b>	<b>11 795</b>

## Költségvetési és pályázati támogatás és felhasználása

Központi költségvetésből a Társulat 2014-ben 3 000 eFt-ot kapott. Ebből 2 000 eFt-ot a Nemzeti Kulturális Alaptól a *Fizikai Szemle* megjelentetésének, szerkesztési és nyomdai költségeinek részbeni fedezésére; 1 000 eFt-ot az Emberi Erőforrások Minisztériumától a XXIII. Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny lebonyolításával kapcsolatos dologi kiadások részbeni fedezetére. Emellett pályázati úton a Társulat elnyert 1 600 eFt támogatást a Jövőnk Nukleáris Energetikusaért Alapítványtól, amit a CERN-i tanártoábbképzés költségeinek részbeni fedezésére fordítottunk. A Társulat a Magyar Tudományos Akadémiától 2 800 eFt-ot kapott a *Fizikai Szemle* előállítási költségeinek részleges fedezésére.

## Kimutatás a vagyon felhasználásáról

E kimutatás elkészítéséhez tartalmi előírások nem állnak rendelkezésre, így a Társulat vagyonának fel-

használását illetően csak a mérleg forrásoldalának elemzésére szorítkozhatunk. A Társulat vagyonát tőkéje testesíti meg, amely a tárgyév eredményének figyelembevételével 107 eFt értékben növekedett. Így az 1989. évi állapotot tükröző induló tőkéhez (7 581 eFt) képest a tárgyév mérlegében mutatkozó, halmozott induló tőkeváltozás (-2 187 eFt) ezzel az értékkel növekedett, értéke tehát jelenleg -2 080 eFt. Így a Társulat saját tőkéjének jelenlegi, a mérleg szerint és a tárgyév eredményének figyelembevételével számított értéke 5 501 eFt, szemben a tárgyévét megelőző, 2013. évre vonatkozó, hasonlóképpen számított 5 394 eFt tőkeértékkel, ami ha csekély is, de növekedés.

## Tagdíj és a személyi jövedelemadó 1%-a

A Társulat a tagdíjából 2014-ben 6 867 eFt bevételhez jutott (4 662 eFt magánszemélyektől, 2 205 eFt jogi személyektől). Ez jóval kevesebb a 2013-as tagdíjak 9 604 eFt összegénél. A 2013. évi személyi jövedelemadó 1%-ának a Társulat céljaira történt felajánlásából a tárgyévben 677 eFt bevétel származott, ami sajnos kevesebb az előző évi 782 eFt-nál. Ezt az összeget a Társulat a *Fizikai Szemle* nyomdai költségeinek részleges fedezeteként, valamint a Társulat által szervezett tehetséggon-dozó versenyek támogatására használta fel.

## Cél szerinti juttatások

A Társulat valamennyi természetes tagja (jelenleg 877 fő) – a fennálló tagsági viszony alapján – a tagok számára természetben nyújtott, cél szerinti juttatásként kapta meg a Társulat hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 2014-ben megjelentetett évfolyamának számait.

## Közcélú támogatások, adományok

A Társulat 2014-ben összesen 8 864 eFt közcélú támogatást kapott, ami tartalmazza a központi költségvetésből, illetve pályázatból, valamint a személyi jövedelemadó 1%-ából kapott összegeket.

Ezen túlmenően kapott támogatások:

Paksi Atomerőmű Zrt.	750 eFt
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont	400 eFt
Budapesti Elektromos Művek	250 eFt
MTA Energiatudományi Kutatóközpont	125 eFt
MTA TTK MFA	125 eFt
MTA Izotópkutató Intézet	100 eFt
B&T Service Kft.	100 eFt
Semilab Zrt.	50 eFt
magánszemélyek	132 eFt

A Társulat 2014-ben 7 175 eFt adományt is kapott:

MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt.	3 500 eFt (különböző fizikaversenyek)
MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt.	400 eFt (Ifjú Kutatók)
National Instruments Hungary Kft.	400 eFt (Science on Stage)
National Instruments Hungary Kft.	300 eFt ( <i>Fizikai Szemle</i> )

## Az egyszerűsített éves beszámoló eredménykimutatása a 2014. évről

	alaptevékenység		vállalkozási tevékenység		összesen	
	előző év (eFt)	tárgyév (eFt)	előző év (eFt)	tárgyév (eFt)	előző év (eFt)	tárgyév (eFt)
<b>BEVÉTELEK</b>						
1. Értékesítés nettó árbevétele	15 294	16 228	2 620	2 550	17 914	18 778
2. Aktivált saját teljesítmények értéke	0	0	0	0	0	0
3. Egyéb bevételek	24 564	22 940	0	0	24 564	22 940
– tagdíj, alapítótól kapott befizetés	9 604	6 867	0	0	9 604	6 867
– támogatások	9 675	8 864	0	0	9 675	8 864
– adományok	5 285	7 175	0	0	5 285	7 175
4. Pénzügyi műveletek bevételei	207	139	0	0	207	139
5. Rendkívüli bevételek	4	0	0	0	4	0
ebből: alapítótól kapott befizetés	0	0	0	0	0	0
támogatások	0	0	0	0	0	0
A. Összes bevétel (1+2+3+4+5)	40 069	39 307	2 620	2 550	42 689	41 857
ebből: közhasznú tevékenységek bevételei	27 466	29 881	0	0	27 466	29 881
<b>RÁFORDÍTÁSOK</b>						
6. Anyagjellegű ráfordítások	24 235	25 730	85	104	24 320	25 834
7. Személyi jellegű ráfordítások	15 607	14 245	528	571	16 135	14 816
ebből: vezető tisztségviselők juttatásai	0	0	0	0	0	0
8. Értékcsökkenési leírás	76	129	0	0	76	129
9. Egyéb ráfordítások	138	417	24	74	162	491
10. Pénzügyi műveletek ráfordításai	467	439	27	26	494	465
11. Rendkívüli ráfordítások	0	15	0	0	0	15
B. Összes ráfordítás (6+7+8+9+10+11)	40 523	40 975	664	775	41 187	41 750
ebből: közhasznú tevékenység ráfordításai	34 478	35 272	0	0	34 478	35 272
<b>EREDMÉNY</b>						
C. Adózás előtti eredmény (A+B)	-454	-1 668	1 956	1 775	1 502	107
12. Adófizetési kötelezettség	0	0	0	0	0	0
D. Adózott eredmény (C-12)	-454	-1 668	1 956	1 775	1 502	107
13. Jávahagyott osztalék	0	0	0	0	0	0
E. Tárgyévi eredmény (D-13)	-454	-1 668	1 956	1 775	1 502	107
<b>TÁJÉKOZTATÓ ADATOK</b>						
A. Központi költségvetési támogatás	6 000	3 300	0	0	6 000	3 300
B. Helyi önkormányzati költségvetési támogatás	0	0	0	0	0	0
C. Az Európai Unió strukturális alapjaiból, illetve a Kohéziós Alapból nyújtott támogatás	0	0	0	0	0	0
D. Normatív támogatás	0	0	0	0	0	0
E. A személyi jövedelemadó meghatározott részének az adózó rendelkezése szerinti felhasználásáról szóló 1996. évi CXXVI. tv. alapján átutalt összeg	782	677	0	0	782	677
F. Közzolgáltatási bevétel	0	0	0	0	0	0

Richter Gedeon Nyrt.  
300 eFt (Science on Stage)  
Richter Gedeon Nyrt.  
300 eFt (Öveges-verseny)  
MVM Magyar Villamos Művek Zrt.  
300 eFt (Öveges-verseny)

Ericsson Magyarország Kft.  
300 eFt (Kutatók éjszakája)  
Knorr-Bremse Magyarország  
300 eFt (Fizikatanári Ankét)  
Paksi Atomerőmű Zrt.  
300 eFt (Sugárvédelmi szakcsoport)

Morgan Stanley Magyarország Elemző Kft.

250 eFt (DOFFI)

Eger Megyei Jogú Város Önkormányzata

200 eFt (Fizikatanári Ankét)

Semilab Zrt.

100 eFt (DOFFI)

Magnificat Kft.

75 eFt (*Vákuumfizika* tankönyv)

Paksi Atomerőmű Zrt.

50 eFt (Öveges-verseny)

Femtovics Kft.

50 eFt (Öveges-verseny)

Gabonakutató Nonprofit Kft.

50 eFt (Öveges-verseny)

A fenti támogatásokat, adományokat – amelyeket köszönünk – tanárok továbbképzésére, tanulmányútra és tehetséggondozó versenyek szervezésére fordítottuk.

### Vezető tisztségviselőknek nyújtott juttatások

A Társulat vezető tisztségviselői ezen a címen 2014-ben sem részesültek semmilyen külön juttatásban. A tisztségviselők a Társulat tagjaiként, a Társulat valamennyi tagjának a tagsági viszony alapján járó cél szerinti juttatásként kapták meg a *Fizikai Szemle* 2014. évi évfolyamának számait.

## II. rész – Tartalmi beszámoló a közhasznú tevékenységről

A Társulat közhasznú tevékenységeit a következő négy csoportba osztva foglaljuk össze: tudományos tevékenység, kutatás; szakmai folyóiratok, kulturális örökség megóvása; tehetséggondozás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés; valamint köznevelés, tanár-továbbképzés.

### Tudományos tevékenység, kutatás

A tudományos tevékenység és a kutatás területén a tudományos eredmények közzétételének, azok terjesztésének, megvitatásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadóülések, előadásorozatok, valamint más tudományos rendezvények szervezését és lebonyolítását emeljük ki. Például: 4. Doktori Konferencia (DOFFI), 39. Sugárvédelmi továbbképző tanfolyam, az Anyagtudományi és Diffrakciós Szakcsoport Őszi Iskolája, Rézecskefizikai szemináriumok, Marx György emlékülés, *Robert D. Du-bois* tiszteletbeli tag székfoglaló előadása.

A Területi és Szakcsoportok által szervezett előadássorozatok, bemutató előadások. Például: Egy kis esti fizika, Fizikus Napok, Szkeptikus Konferencia, Kutatók Éjszakája.

A közhasznú tevékenységhez kapcsolódó jogszabály: 2004. évi CXXXIV. tv. a kutatás-fejlesztésről és a technológiai innovációról 5. §. A közhasznú tevékenység célcsoportja és a tevékenységből részesülők létszáma: kutatók, egyetemi oktatók, fizikusok, orvosok

### Közhasznú jogállás megállapításához szükséges mutatók

Alapadatok	(eFt)	
	előző év (1)	tárgyév (2)
A. Vezető tisztségviselőknek nyújtott juttatás összesen	0	0
B. Éves összes bevétel ebből:	42 689	41 857
C. A személyi jövedelemadó meghatározott részének az adózó rendelkezése szerinti felhasználásáról szóló 1996. évi CXXVI. tv. alapján átutalt összeg	782	677
D. Közzolgáltatási bevétel	0	0
E. Normatív támogatás	0	0
F. Az Európai Unió strukturális alapjaiból, illetve a Kohéziós Alapból nyújtott támogatás	0	0
G. Korrigált bevétel [B-(C+D+E+F)]	41 907	41 180
H. Összes ráfordítás (kiadás) ebből	41 187	41 750
I. Személyi jellegű ráfordítás	16 135	14 816
J. Közhasznú tevékenység ráfordításai	34 478	35 272
K. Adózott eredmény	1 502	107
L. A szervezet munkájában közreműködő közérdekű önkéntes tevékenységet végző személyek száma (a közérdekű önkéntes tevékenységről szóló 2005. évi LXXXVIII. tv-nek megfelelően)		
Erőforrás-ellátottság mutatói	mutató teljesítése	
	igen	nem
Ectv. 32. § (4) a) [(B1+B2)/2 > 1 000 000,- Ft]	×	
Ectv. 32. § (4) b) [K1+K2 ≥ 0]	×	
Ectv. 32. § (4) c) [(I1+I2-A1-A2)/(H1+H2) ≥ 0,25]	×	
Társadalmi támogatottság mutatói	mutató teljesítése	
	igen	nem
Ectv. 32. § (5) a) [(C1+C2)/(G1+G2) ≥ 0,02]		×
Ectv. 32. § (5) b) [(J1+J2)/(H1+H2) ≥ 0,5]	×	
Ectv. 32. § (5) c) [(L1+L2)/2 ≥ 10 fő]		×

(≈900 fő). A közhasznú tevékenység főbb eredményei: legújabb tudományos eredmények széleskörű ismertetése, terjesztése.

### Szakmai folyóiratok, kulturális örökség megóvása

A Társulat gondozásában 1951 óta havonta megjelenő hivatalos folyóirat a *Fizikai Szemle*. 2014-ben a *Fizikai Szemle* mellékleteként egyrészt megjelent egy poszter a

Föld energia-háztartásáról, valamint egy újabb csillagászati témájú kiadvány, egy poszter *Helyünk a Világegyetemben* címmel. Ezek az anyagok ingyen letölthetők a *Fizikai Szemle* honlapjáról azzal a céllal, hogy kithetők legyenek fizika-előadók, iskolafolyosók falára. A Kulturális Örökség Díjas *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* társtulajdonosaként támogatjuk a folyóirat megjelenítését. Kulturális örökségünk megóvása érdekében rendszeresen megkoszorúzzuk fizikus nagyjaink síremlékét. Például *Eötvös Loránd* síremléke, *Bozóky László* síremléke, *Gábor Dénes* emléktáblája, *Marx György* síremléke és további fizikus nagyjaink síremlékének, emléktáblájának koszorúzása.

A közhasznú tevékenységhez kapcsolódó jogszabály: 2001. évi LXIV. tv. a kulturális örökség védelméről 5. §(1). A közhasznú tevékenység célcsoportja és a tevékenységből részesülők létszáma: diákok, oktatók, pedagógusok, fizikusok, orvosok (≈1700 fő). A közhasznú tevékenység főbb eredményei: ismeretterjesztés, tehetséggondozás és kulturális értékek megőrzése.

Tehetséggondozás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés

A Társulatnak a képességfejlesztés szolgálatában álló tevékenysége az általános iskolai korosztálytól kezdve az egyetemi oktatásban résztvevőkig terjedően kínál felmérési lehetőséget a fizika iránt fokozott érdeklődést mutató diákok, hallgatók számára. A 2014-ben szervezett és lebonyolított, adott esetben több száz főt is megmozgató versenyek száma változatlanul meghaladja a húszat. Ezek között számos olyan is szerepel, amelyek hosszabb idő óta évente rendszeresen megrendezésre kerülnek.

A legfontosabb országos és helyi jellegű fizikaversenyeink: Eötvös-verseny, Ortva Rudolf Nemzetközi Fizikai Feladatmegoldó-verseny, Öveges József Kárpát-medencei Fizikaverseny, Országos Szilárd Leó Fizikaverseny, Budó Ágoston Fizikai Feladatmegoldó Verseny, Lánosz Kornél Fizikaverseny, Hatvani István Fizikaverseny, Bay Zoltán Fizikaverseny, Simonyi Károly Fizikaverseny, Varázstorony vetélkedő, Játszunk Fizikát verseny.

A Társulat szervezésében működik a Nemzetközi Fizikai Diákolimpiára felkészítő szakkör. Szakmai felügyeletet látunk el a BSCA kuratóriumán keresztül a Csodák Palotája működése fölött. Továbbra is sikeres a Fizibusz program az ELMŰ támogatásával. Említést érdemel még az Ericsson támogatásával megrendezett Kutatók Éjszakája. Létrehoztuk a Társulat tehetségpontját, amely az új székhelyen (Budapest, IX. kerület Ráday utca 18.) működik.

A közhasznú tevékenységhez kapcsolódó jogszabály: 2011. évi CXCV. tv. a nemzeti köznevelésről 19. §. A közhasznú tevékenység célcsoportja és a tevékenységből részesülők létszáma: diákok, főiskolai és egyetemi hallgatók (≈4350 fő). A közhasznú tevékenység főbb eredményei: érdeklődés felkeltése a fizika és a természettudományok iránt; tehetségek megtalálása, kiválasztása és képességfejlesztés; tudományos ismeretterjesztés.

Köznevelés, tanártovábbképzés

A tanártovábbképzés a Társulat oktatási szakcsoportjai, valamint területi csoportjai szervezésében folyt. A fizikatanár-közösség számára módszertani segítséget, tapasztalatcsere és szakmai továbbképzés lehetőséget kínált az oktatási szakcsoport által 2014. évben megrendezett, elismert továbbképzésként akkreditált Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, amelyet Egerben rendeztünk. Kiemelt feladatunk a fizika és általában a természettudományok közoktatásban betöltött szerepével való foglalkozás, például pedagógus életpályamodell, minősítési rendszer, pedagóguskar, tankönyvfejlesztés stb. A Társulat szervezésében fizikatanárok több mint 40 fős csoportja vett részt 2014-ben is a CERN-ben magyar nyelven megtartott továbbképzésen. 2014-ben megszerveztük a Science on Stage nemzetközi fesztivál előválogató versenyét Debrecenben. Maga a fesztivál 2015 nyarán Londonban lesz. A Rátz Tanár Úr Életműdíjjal, valamint az Ericsson-díjjal kitüntetett fizikatanárok kiválasztását a Társulat ezzel foglalkozó díjbizottsága készítette elő. Megemlítendő még a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen évente megrendezésre kerülő a *Kísérletek, amiket látni kell* című kísérleti bemutató. 2014-ben először MyDAQ pályázatot hirdettünk tanároknak.

A közhasznú tevékenységhez kapcsolódó jogszabály: 2011. évi CXCV. tv. a nemzeti köznevelésről 19. §. A közhasznú tevékenység célcsoportja és a tevékenységből részesülők létszáma: általános és középiskolai tanárok (≈550 fő). A közhasznú tevékenység főbb eredményei: az akkreditált tanári továbbképzés szervezésével állami feladatot látunk el. A CERN-i továbbképzés, valamint a Science on Stage fesztivál résztvevői bepillantást nyerhetnek a nemzetközi kutatási eredményekbe is.



A kutatás területén elért eredmények elismerésére a Társulat 2014-ben is odaítélte tudományos díjait, amelyek közül a Budó Ágoston-díj (*Lengyel Krisztián*), a Detre László-díj (*Moór Attila*), a Gombás Pál-díj (*Szirmai Gergely*), a Schmid Rezső-díj (*Pusztai László*), a Selényi Pál-díj (*Erdélyi Zoltán*) és a Szalay Sándor-díj (*Kertész Zsófia*) került kiadásra. A Felsőoktatási-díjat 2014-ben *Hadházy Tivadar* kapta.

A Társulat Küldöttközgyűlése a 2014. évi ELFT-érmet *Szatmáry Zoltánnak* ítélte oda.

A Marx György Fizikai Szemle nívódíjban *Varga Péter* részesült.

Az általános és középiskolai tanároknak adományozható Mikola Sándor-díjat 2013-ban *Reszegi Miklós* és *Ujvári Sándor* kapták.

Ericsson-díjat kaptak 2014-ben a fizika népszerűsítéséért *Tasi Zoltánné* és *Pál Zoltán*; a fizika tehetségeinek gondozásáért *Varga Mária* és *Kiss Géza*.

Az Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért Rátz Tanár Úr Életműdíjában *Tóth Eszter* és *Zátonyi Sándor* részesültek.

# Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2015. évi Küldöttközgyűlése

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat éves Küldöttközgyűlését 2015. május 16-án tartotta az ELTE TTK Eötvös-termében (Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A).

A napirend előtti – szokás szerint tartalmas és élvezetes – szakmai előadást *Nicolaus Stolterfoht* (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie), az ELFT tiszteletbeli tagja tartotta meg *Interaction of highly charged ions with metal and insulator surfaces: the fascination of hollow atoms* címmel, amely egyúttal a professzor székfoglaló előadása volt.

Miután meggyőződött arról, hogy a Küldöttközgyűlés határozatképes – a 82 küldöttből 56 megjelent – *Patkós András*, a hivatalba lépő elnök megnyitotta a Küldöttközgyűlést, köszöntötte a küldötteket, a meghívottakat, az elnökséget, valamint a Társulat érdeklődő tagjait, majd rövid megnyitó beszédet mondott.

Ezután megtörtént – a Közgyűlés egyhangú egyetértésével – a Szavazatszámoló Bizottság (*Tóth József, Újvári Sándor, Zubonyainé Pelka Zsuzsanna*), a Mandátumszámoló Bizottság (*Kirsch Éva, Moróné Tapody Éva*), a Jegyzőkönyvvezető (*Pónya Melinda*) és a Jegyzőkönyv-hitelesítők (*Nagy Zsigmondné, Szénási Istvánné*) felkérése.

A Közgyűlés jóváhagyta a napirendet, amely a következő lett:

1. Elnöki megnyitó (*Patkós András*)
2. A Szavazatszámoló Bizottság felkérése
3. Főtitkári beszámoló (*Kürti Jenő*)
  - A Társulat 2014. évi közhasznúsági jelentése
  - A Társulat 2015. évi költségvetése
4. A Felügyelő Bizottság jelentése (*Újfalussy Balázs*)
5. Az Elnökség javaslata az Alapszabály 2016-os módosításának irányelveiről
6. Az Elnökség javaslata az ELFT-érem és a Prométheusz-érem odaítélésére, valamint a Társulat új tiszteletbeli tagjaira
7. Vita a napirend 3–6. és nyílt szavazás a napirend 3–5. pontjával kapcsolatban
8. Az Elnökség visszaadja megbízatását a Küldöttközgyűlésnek
9. A Jelölőbizottság előterjesztése új tisztségviselők megválasztására (*Tímár János*)
10. Vita a jelölésekről, helyszíni jelölés, nyílt szavazás a szavazólapra kerülő jelöltekről
11. Szünet és titkos szavazás az új tisztségviselőkről, valamint az ELFT-éremre, Prométheusz-éremre és a tiszteletbeli tagságra jelöltekről
12. A Társulat díjainak kiosztása
13. A szavazás eredményének kihirdetése
14. Elnöki zárszó (*Patkós András*).

Ezt követően tartotta meg Kürti Jenő főtitkári beszámolóját. A Küldöttközgyűlés elé terjesztette a Társulat 2014. évi közhasznúsági jelentésének gazdálkodási és számviteli beszámolóját, a tartalmi beszámolót, valamint a 2015. évi költségvetési tervet.

Az új Civil Törvénynek (2011. évi CLXXV. tv.) megfelelően az egyszerűsített éves beszámolónak és közhasznúsági mellékletének a tartalma:

- egyszerűsített éves beszámoló, mérleg;
- eredménykimutatás (bevételek és kiadások);
- szakmai rész, tevékenységek bemutatása;
- közhasznú tevékenység érdekében felhasznált vagyontárgy kimutatása;
- közhasznú jogállás megállapításához szükséges mutatók;
- pályázatok, támogatások.

A beszámolót a közhasznúsági mellékletekkel be kell mutatni a Közgyűlésnek, jóvá kell hagyni, majd továbbítani kell az Országos Bírósági Hivatalnak.

A beszámolót és közhasznúsági mellékleteit a *Fizikai Szemle* jelen számában külön részleteztük, ezért itt csak a 2014. évi költségvetés, valamint a 2015. évi költségvetés legfontosabb számainak foglalkozunk össze.

## A 2014. évi költségvetés:

A Társulat vagyona: 5 501 000 Ft.

Tárgyévi eredmény 107 444 Ft (az eredmény csökkent az előző évihez képest).

Közvetlen költségvetési, illetve pályázati támogatás: Öveges József Fizikaversenyre az Emberi Erőforrások Minisztériumától (1 000 eFt), a CERN-i tanár-továbbképzésre a Jövők Nukleáris Energetikusaért Alapítványtól (1 600 eFt), *Fizikai Szemlére* a Nemzeti Kulturális Alaptól (2 000 eFt), *Fizikai Szemlére* az MTA-tól (2 800 eFt).

SZJA 1%: 676 997 Ft. (Ez sajnos évek óta folyamatosan csökken: 2013-ban 782 eFt, 2012-ben 886 eFt, 2011-ben 1 067 eFt.)

Cél szerinti juttatás: a tagdíj fejében kapják a tagok a *Fizikai Szemlét*.

Eredménykimutatás: összes bevétel 41 857 508 Ft, összes kiadás 41 750 064 Ft. Ebből az eredmény 107 444 Ft.

Nicolaus Stolterfoht, az ELFT tiszteletbeli tagja.



Fotók: Kármán Tamás



Külön kell venni az alaptevékenységet és a vállalkozási tevékenységet. A *Fizikai Szemle* a vállalkozási részhez tartozik.

A tagdíjak kérdésére a főtítkár külön kitért. 2014-ben a magánszemélyektől származó tagdíj összege: 4661900 Ft volt. Sajnos ez kis csökkenést jelent, ugyanis 2013-ban még 4906 eFt volt. Ennek oka az egyes tagdíjak 2014-es csökkentése. A tagság létszámát ugyanis növelni szeretné a Társulat, ennek érdekében 2014-ben a tagdíjak nagyságát csökkentettük a tanárok és a 30 év alattiak számára: tanároknak 8000 Ft helyett 5000 Ft, diákoknak 3500 Ft helyett 3000 Ft lett az új tagdíj. Emellett minden 30 évnél fiatalabb számára a diákokéval azonos tagdíjat határoztunk meg (a 30 év alatti, már nem diákoknak 8000 Ft-ról 3000 Ft-ra csökken így az éves tagdíja). Valószínűleg ennek következményeként a tagdíjat fizetők száma a korábbi 800-ról 2014-ben 877-re emelkedett. Sajnos azonban ez nem bizonyult elegendőnek a tagdíjcsökkentés miatt kieső bevétel kompenzálására. A főtítkár ezzel kapcsolatban bemutatott egy tanulságos grafikont, amely a Társulatba belépő tagok számának alakulását mutatta éves bontásban a kezdetek (1948) óta. Az elmúlt 10 évben az évente belépő új tagok száma 30-40 között ingadozott. Egyetlen kivétel 2008-ban volt, amikor 72-en léptek be. Ehhez képest kiemelkedő szám a 2014-ben belépő 127 új tag. Ennél nagyobb csak az 1998-as szám volt, amikor 155 új tag lépett be az ELFT-be. Nagyon jó lenne hasonló növekedési ütemet tartani a következő években is.

#### A 2015. évi költségterv:

Eredmény összesen: -351 250 Ft. Ennek oka személyi változásokban kereshető, valamint abban, hogy az egyes pályázatokon idén kevesebb pénzt nyertünk el, mint tavaly. Pozitívum, hogy a Paksi Atomerőműtől mégis megkapjuk a *Fizikai Szemlére* a támogatást! (A Társulat nem profitorientált szervezet.)

A területi csoportok támogatására idén is 350 000 Ft-ot terveztünk. A *Fizikai Szemle* eredménye körülbelül 190 000 Ft lesz.

Nagy Zsigmondnének Kürti Jenő főtítkár mond köszönetet.



A Társulat életében pozitívum, hogy több cég továbbra is jelentős összegekkel támogatja működésünket. Legnagyobb támogatóinknak külön köszönjük a segítséget. Ezeket a támogatásokat, adományokat elsősorban tanárok továbbképzésére, illetve tehetséggondozó tanulmányi versenyek szervezésére fordítottuk.

2014-ben kapott adományok, részletesen lásd a szám 282-284 oldalain: MOL Magyar Olaj- és Gázipari Nyrt. (3900 eFt), National Instruments Hungary Kft. (700 eFt), Richter Gedeon Nyrt. (600 eFt), MVM Magyar Villamos Művek Zrt. (300 eFt), Ericsson Magyarország Kft. (300 eFt), Knorr-Bremse Magyarország (300 eFt), Paksi Atomerőmű Zrt. (350 eFt), Morgan Stanley Magyarország Elemző Kft. (250 eFt), Eger Megyei Jogú Város Önkormányzata (200 eFt), Semilab Zrt. (100 eFt), Magnificat Kft. (75 eFt), Femtovics Kft. (50 eFt) és Gabonakutató Kft. (50 eFt).

2014-ben jogi és pártolói tagdíjat fizettek: Paksi Atomerőmű Zrt. (750 eFt), MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont (400 eFt), Budapesti Elektromos Művek (250 eFt), MTA Energiatudományi Kutatóközpont (125 eFt), MTA TTK MFA (125 eFt), MTA Izotópkutató Intézet (100 eFt), B&T Service Kft. (100 eFt) és Semilab Zrt. (50 eFt). Nagyon köszönjük a jogi és pártolói tagdíjat fizető szervezeteknek a segítséget.

Rajtuk kívül hálásan köszönjük az egyéni pártolói díjat fizetők (*Barabási Albert László és Forró László*) segítségét.

Az MTA által felajánlott *Simonyi Károly A fizika kultúrtörténete* című könyv legújabb kiadásából 2014-ben 13 darabot használtunk fel különböző tanulmányi versenyeken, illetve a Tanári Ankéton történő díjazásokra.

A 2014-es évre vonatkozó részletes tartalmi beszámoló megtalálható a *Fizikai Szemle* jelen számában a közhasznúsági jelentésben, ezért annak tárgyalására itt nem térünk ki. Mindössze azzal egészítjük ki az ott leírtakat, hogy az ELFT honlapjának használhatósága 2014-ben tovább javult és a Társulat életével kapcsolatos minden fontos információ megtalálható honlapunkon, illetve Facebook-oldalunkon.

Ezt követően a főtítkár tájékoztatta a Küldöttközgyűlést néhány bekövetkezett, illetve a közeljövőben bekövetkező szervezeti-működési, valamint személyi változásról:

- Az ELFT titkársága a KFKI-ból a IX. kerület Ráday utca 18-ba költözött.
- A székhely 1027 Budapest, Fő utca 68-ról módosult az 1092 Budapest, Ráday utca 18-ra.
- Megalakultak a Szakosztályok, valamint a Szilárdtest-fizikai Szakcsoport.
- *Füstöss László* idén ősztől sajnos nem tudja tovább vállalni a *Fizikai Szemle* szerkesztését. Köszönjük eddigi munkáját. Fontos feladat lesz az új szerkesztő megtalálása.
- Nagy Zsigmondné ügyvezető nyugdíjazása miatt *Kovács Bernadett* lesz az új ügyvezető 2015. július 1-jétől. A Közgyűlés elbúcsúztatta és egyben megköszönte Nagy Zsigmondnének az ELFT-ért végzett több évtizedes áldozatos munkáját. Kovács Bernadett bemutatkozott a jelenlevőknek.



Az ELFT-érmét Lohner Tivadar érdemelte ki.

Ezt követően került sor a Felügyelő Bizottság jelentésére. A Bizottság jelentését Újfalussy Balázs bizottsági elnök helyett *Fábián Margit* ismertette.

A Felügyelő Bizottság feladatának megfelelően figyelemmel kísérte a Társulat működését. A 2014-es év gazdálkodása a főösszeget tekintve nagyjából a tervezetnek megfelelően alakult. Ez ebben az évben is a *Fizikai Szemle* kiadását segítő pályázatok sikerének, illetve a működésre kapott támogatásoknak köszönhető. A folyó évre vonatkozó tervekben szereplő főösszeg kis mértékben magasabb a tavalyinál. Ezt az eddigi tapasztalatok alapján a tervezettség határain belül reálisnak látjuk. Öröndetes, hogy a *Fizikai Szemle* anyagi helyzete 2015-ben is stabilnak ígérkezik, amennyiben a pályázatok és támogatások befolyának. Sajnos nem minden területi csoport küldte be szakmai és pénzügyi beszámolóját és költségtervét. Ennek ellenére az elmúlt évben is négy területi csoport kapott kisebb-nagyobb összeget a működésre. A költségvetésben a tavalyi előiránnyal megegyezően a területi csoportok támogatására ebben az évben is 350 eFt van tervezve. Az Elnökség az Alapszabályban meghatározottaknak megfelelően működött, a nyári szünetet kivéve havi rendszerességgel megtartotta üléseit. Az évek óta rendszeresen ellátott feladatok mellett az aktuális problémák megoldására több nyílt tanácskozásnak is helyet adott. Az Elnökség többször is foglalkozott a hosszú távú stratégia kérdésével. 2015-ben a Társulat egy új, országos rendezvénnyel (*A fizika mindenké*) jelentkezett, amelynek előkészítő munkái nagyrészt már 2014-ben megkezdődtek, végül idén áprilisban országosan 52 helyszínen zajlott le sikeresen. A Felügyelő Bizottság figyelemmel kísérte az új ügyvezető titkár személyének kiválasztását is.

Mindent egybevetve a Felügyelő Bizottság úgy látja, hogy az elmúlt évben a Társulat működése megfelelt az Alapszabálynak és az Ügyrendnek, valamint a rendeleti előírásoknak. A Társulat Elnökségével és Titkárságával a Bizottság együttműködése zavartalan volt.

A Bizottság kéri a jelentés tudomásulvételét.

Ezt követően a főtitkár ismertette az Elnökség javaslatát az Alapszabály 2016-os módosításának irányelveiről. Kürti Jenő elmondta, hogy a Küldöttközgyűlés az Alapszabályt a 2015. januári rendkívüli közgyűlésen lefolyt vitának megfelelően a kivetített tartalmi pontokban kívánja módosítani:

1. *a. változat:* Az Elnökség és a Felügyelő Bizottság választásának periódusa *három év* úgy, hogy az adott tisztségbe megszakítás nélkül mindenki egyszer újraválasztható. A Jelölőbizottságot a Küldöttközgyűlés az Elnökségre és a Felügyelő Bizottságra kiterjedő tisztújítást megelőző évben választja meg és megbízatása szintén három évre szól.

A területi és szakcsoportok, valamint a szakosztályok választásának periódusa változatlan újraválasztási szabályok mellett három év.

*b. változat:* Az Elnökség és a Felügyelő Bizottság választásának periódusa *négy év* úgy, hogy az adott tisztségbe megszakítás nélkül mindenki egyszer újraválasztható. A Jelölő Bizottságot a Küldöttközgyűlés az Elnökségre és a Felügyelő Bizottságra kiterjedő tisztújítást megelőző évben választja meg és megbízatása négy évre szól.

2. A tíz főből álló Elnökség tagjai:

- elnök és alelnök,
- főtitkár,
- hét elnökségi tag.

3. Az elnök és az alelnök közül az egyik kutató vagy felsőoktatási oktató, a másik közoktatásban aktív fizikatanár. Az elnököt akadályoztatás esetén az alelnök helyettesíti. Kettőjük közül elsődlegesen a tanár feladata a Társulat képviselete a fizikatanárokat, illetve a fizika oktatását érintő kérdésekben.

4. Az Elnökség kiemelt fontosságú feladata az ifjúsági kapcsolatok ápolása, különös tekintettel az utánpótlás biztosítására, valamint a Társulattal, illetve a fizika eseményeivel kapcsolatos belső és külső kommunikáció. Az e területek gondozásáért felelős elnökségi tagokat a Küldöttközgyűlés személy szerint választja meg.

Az alapszabály-módosításról szavaz a Közgyűlés.





Solymosi József Bozóky László-díjat kapott.

5. Az új szerkezettel megszűnik a megválasztott és a leköszönő elnök funkciója, rendkívüli esetektől eltekintve mindenkit egy időben és ugyanarra az időtartamra választanak.

A Küldöttközgyűlés felkéri az Elnökséget, hogy a 2016. évi küldöttközgyűlésre terjessze elő a fenti pontoknak megfelelő Alapszabály-változtatási ajánlást, és tegyen javaslatot az új szerkezetre való áttérés módjára.

A vitában többen hozzászóltak a kívánt módosítások pontjaihoz.

*Moróné Tapody Éva* az 5. ponttal kapcsolatban úgy érzi, hogy az eddigi választási rendszer jól működött. Szükség van leköszönő és megválasztott elnökre is, hogy egy évig együtt tudjanak dolgozni.

*Woynarovich Ferenc:* A csúsztatás megoldható. Azért vetődött fel a rövidebb megbízatás lehetősége, mert sokan nem tudják elkötelezni magukat hosszú időre. A tervek szerint a tisztségek elnevezései is meg fognak változni.

Geretovszky Zsolt a Schmid Rezső-díjjal.



Patkós András elmondta, hogy a jelenlegi tisztújításon sem az egész elnökséget cseréljük le.

*Nagy Dénes Lajos* a három évet preferálná. Ha két-tő ciklusban gondolkodunk, akkor az már hat év.

*Deme Sándor* szerint a négy éves időszak már jól bevált a szakcsoportoknál.

*Kovách Ádám* felvetette, hogy az újválasztás történhet csak a fele időszakra. Például ha négy éves ciklus van, akkor utána csak kettő évre lehessen újválasztani.

*Pécz Béla:* A bírósági bejegyzési folyamat elég bonyolult és hosszadalmas, ezért jobb lenne, ha hosszabb ideig lehetne betölteni egy tisztséget. A négy évet preferálja.

*Woynarovich Ferenc:* A Jelölőbizottság elmondása szerint nagyon nehéz a tisztségekre jelölteket találni, főleg hosszú időszakra. A jelöltnek nem kell elköteleznie magát kettő ciklusra, de ott van az újválasztás lehetősége. Három évre könnyebb valakit felkérni, mint hatra.

*Csordás András* javasolta, hogy lehetne két alelnök, egy a kutatási területről és egy tanár.

*Nagy Dénes Lajos* szerint az elnökségi és bizottsági tisztségviselőkre vonatkozzon a három év, a szak- és területi csoportokra maradhatna a négy év.

*Solymosi József:* Nem szükséges megkülönböztetni az elnökség tagjait feladat szerint. Az Elnökség maga ossza ki a feladatokat a tagjai között.

*Moróné Tapody Éva* visszavonta a megválasztott és leköszönő elnök funkcióra tett javaslatát.

Ezután szavazás történt kézfeltartással az 5 változtatási pontról, ennek eredménye:

1. – 4 éves ciklus legyen: 37 szavazat.  
– 3 éves ciklus legyen: 18 szavazat.
2. – elnök, 2 alelnök, főtitkár, 6 elnökségi tag: 1 szavazat  
– elnök, 1 alelnök, főtitkár, 7 elnökségi tag: 55 szavazat
3. Az elnök és az alelnök közül az egyik kutató vagy felsőoktatási oktató, a másik közoktatásban aktív fizikatanár. Az elnököt akadályoztatás esetén az alelnök helyettesíti: 56 szavazat.
4. Az ifjúsági kapcsolatok, valamint a belső és külső kommunikáció gondozásáért felelős elnökségi tagokat a Küldöttközgyűlés személy szerint választja meg. 50 igen szavazat, 6 tartózkodás.
5. Az új szerkezettel megszűnik a megválasztott és a leköszönő elnök funkciója, rendkívüli esetektől eltekintve mindenkit egy időben és ugyanarra az időtartamra választanak. 43 igen szavazat, 13 ellenszavazat.

Patkós András felkérte *Woynarovich Ferencet*, hogy a szavazás eredményének megfelelően fogalmazza meg az Alapszabály módosítását.

Ezt követően *Kürti Jenő* ismertette, hogy az elnökség *Lobner Tivadart* javasolja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érmére. *Gyulai József* és *Pécz Béla* röviden bemutatta *Lohner Tivadart*. Az Elnökség Prométheusz-díjra javasolja *Holics Lászlót*. *Csordás András*

és *Mester András* röviden bemutatta *Holics Lászlót*, aki sajnos személyesen nem tudott részt venni a Küldöttközgyűlésen, előzetesen kimentését kérte. Az Elnökség tiszteletbeli tagoknak javasolja *Juhász Tibort* és *Gaetana Laricchiát*. Előbbit *Kroó Norbert*, utóbbit *Kövér Ákos* mutatta be röviden. Vita nem volt, a Közgyűlés elfogadta a javaslatokat, amelyekről majd titkos szavazás lesz.

Ezután folytatódott a vita a napirend 3–5. pontjaival kapcsolatban.

Patkós András megjegyezte, hogy a költségtervben a –351 250 Ft ledolgozható a pályázások, szakértői munkák, konferenciák vállalásával.

*Sükösd Csaba* megköszönte *Füstöss Lászlónak* a *Fizikai Szemle* szerkesztésében végzett munkáját.

Solymosi József elmondta, hogy a Hevesy György-díjat május 7-én *Zagyvai Péter* vehette át.

Kirsch Éva megjegyezte, hogy a Mikola-versenyt a Vermes Alapítvány szervezi, amelyben ELFT társulati tagok is tevékenykednek.

*Lakatos Tibor* elmondta, hogy a Baranya megyei csoport sajnos elmaradt a beszámoló beadásával. A *Kis Esti Fizika* rendezvényük sikeresen lezajlott. A *Fizikai Szemlénél* megtakarítást jelenthetne, ha elektronikus előfizetésre is lenne lehetőség.

Kovács Ádám javasolta, ha a közhasznúsági jelentésben karakterkorlátok vannak, akkor legyen kétféle beszámoló.

Patkós András: Szerencsére az *Euro Physics Letters* a 2013-as osztalékát ki fogja fizetni, így ez is javítani fogja a terv eredményét. Az elektronikus *Fizikai Szemle* bevezetéséről már többször beszélgetett az Elnökség.

A vita végén *Kürti Jenő* megköszönte a leköszönő Elnökség munkáját, és az Elnökség visszaadta megbízatását.

Ezt követően szavazásra került sor, aminek eredményeképpen a főtítkári beszámolót, a 2014. évi közhasznúsági jelentést, a 2015. évi költségtervet és a Felügyelő Bizottság jelentését egyhangúlag elfogadta a Küldöttközgyűlés.

A következő napirendi pont a Jelölőbizottság elterjesztése volt az új tisztségviselők megválasztására. A Jelölőbizottság elnökének megbízásából *Tímár János* elmondta, hogy március 31-ig lehetett jelölteket állítani a szakcsoportoknak. A beérkezett ajánlások alapján *Sólyom Jenő*, a Jelölőbizottság elnöke tárgyalt a szóba jövő jelöltekkel, s így alakult ki a Jelölőbizottság javaslata a Küldöttközgyűlés számára. Egy főtítkárt, 3 alelnököt és 4 főtítkárhelyetteset kell megválasztani, valamint 5 tagot a Felügyelő Bizottságba, mindenkit titkos szavazással. *Tímár János* ismertette a jelöltek rövid életrajzát.

Javasolt főtítkári: *Újfalussy Balázs*, aki vállalja a jelöltséget. Jelölését egyhangúlag elfogadta a Közgyűlés.

Javasolt alelnökök: *Cserti József*, *Kiss Gyula*, *Kürti Jenő*, *Pántyáné Kuzder Mária*. (Cserti József csak alelnöknek választható. A többi jelölt közül, ha valamelyik kiesik, akkor főtítkárhelyettesnek még megválasztható.) Mindegyik jelöltet egyhangúlag elfogadta a Közgyűlés.



A Gombás Pál-díjat Pályi András kapta.

A szavazás két körben történik. A főtítkárhelyettesekről a második körben lesz a szavazás.

Javasolt főtítkárhelyettesek: *Fábián Margit*, *Molnár László*, *Solymosi József*, *Sükösd Csaba*, valamint aki kiesik az alelnökök közül. A Közgyűlés egyhangúlag elfogadta a javaslatot.

A Felügyelő Bizottságba javasolt tagok: *Barabás Péter*, *Fülöp Csilla*, *Halbritter András*, *Heitler Krisztina*, *Lábár János*, *Szabó István*, *Theisz György*.

Vita nem volt, mindenki elfogadta a javaslatokat. Helyszíni jelölés nem volt. A szavazólapokat kiosztották. Azok kaptak szavazólapot, akik leadták küldöttigazolványukat.

Ezután szünet és szavazás következett. A küldötteknek a főtítkárra, az alelnökökre, a főtítkárhelyettesekre, a Felügyelő Bizottság tagjaira, a tiszteletbeli tagokra, valamint az ELFT-éremmel, illetve a Prométheusz-díjjal kapcsolatos személyekre kellett szavazniuk.

A szünet ideje alatt a Szavazatszámoló Bizottság összesítette az eredményeket. Először a két díjazottra

Nógrádi Dániel a friss Novobátzky Károly-díjas.





Erdélyi Miklóst Budó Ágoston-díjjal jutalmazták.



A nívódíjas Gnädig Péter Füstöss Lászlóval.

vonatkozó összesítés történt meg, a következő eredménnyel: Lohner Tivadarra 54-ből 54 igen szavazat, Holics Lászlóra 52-ből 52 igen szavazat.

A folytatódó Közgyűlésen először a díjátadások történtek meg.

A díjakat rövid értékelés után a Díjbizottság elnöke, *Kamarás Katalin* adta át.

Bozóky László-díj: Solymosi József – Nemzeti Közszolgálati Egyetem

Budó Ágoston-díj: *Erdélyi Miklós* – Szegedi Tudományegyetem

Gombás Pál-díj: *Pályi András* – ELTE

Gyulai Zoltán-díj: *Börzsönyi Tamás* – MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Novobátczy Károly-díj: *Nógrádi Dániel* – Eötvös Loránd Tudományegyetem

Schmid Rezső-díj: *Geretovszky Zsolt* – Szegedi Tudományegyetem

ELFT-érem: Lohner Tivadar – MTA EK MFA

Prométheusz-díj: Holics László, aki a díjat a következő elnökségi ülésen veheti át.

Marx György Fizikai Szemle Nívódíj: *Gnädig Péter*.

Börzsönyi Tamás a Gyulai Zoltán-díj átvétele után.



Gratulálunk a díjazottaknak.

Patkós András elmondta, hogy a Díjbizottság ebben a felállásban még 1 évig működik. Patkós András és *Jánossy András* kilépett a bizottságból, helyükre *Palla László* és *Szunyogh László* kerül.

Ezt követően a Szavazatszámoló Bizottság nevében Tóth József kihirdette a tisztségviselőkre vonatkozó eredményt. Minden személyre 56 érvényes szavazólap érkezett.

A főtítkár 56 igen szavazattal Újfalussy Balázs lett.

A három alelnök: Kürti Jenő (52 igen), Pántyáné Kuzder Mária (45), Cserti József (44).

Kiss Gyula 18 igen szavazatot kapott és átkerült főtítkárhelyettesi jelölésbe.

A Felügyelő Bizottság öt tagja a leadott igen szavazatok alapján: Heitler Krisztina (49), Theisz György (41), Fülöp Csilla (37), Szabó István (37), Lábár János (33).

Barabás Péter 30, Halbritter András 26 szavazatot kapott.

A tiszteletbeli tagokra leadott igen szavazatok: Juhász Tibor (46 igen), Gaetana Laricchia (37 igen).

A titkos szavazás, egy külön második körben, a négy megválasztható főtítkárhelyettesről is megtörtént, ahol megint mindenkire 56 érvényes szavazólap érkezett: Fábíán Margit (52 igen), Sükösd Csaba (50 igen), Molnár László (45 igen), Kiss Gyula (40 igen). Rajtuk kívül Solymosi József 28 igen szavazatot kapott.

Gratulálunk a megválasztottaknak, és kérjük azok további segítségét is, akik most nem jutottak külön nevesített tisztséghez.

A zárszóban Patkós András elnök elmondta, hogy ez az év eddig jól indult. A Tanári Ankéton is és az Öveges-versenyen is jóval magasabb volt a résztvevők létszáma, mint a korábbi években. A tankönyvek véleményezésére az OFI az ELFT-vel fog szerződést kötni. Az első alkalommal megrendezett *A fizika mindenké* is sikeresen lezajlott. Ősszel megkezdjük a 2016-os szegedi Vándorgyűlés szervezését.

Elnök úr megköszönte a jelenlevőknek a Küldöttközgyűlésen való megjelenést és a Bizottságok munkáját, végül bezárta az ülést.

# A fizika mindenkié rendezvény margójára

A *fizika mindenkié* rendezvény célja az volt, hogy országszerte a falvaktól a nagyvárosokig, az általános iskoláktól az egyetemekig legyen egy nap, amikor minden a fizikáról szól, arról a tudományról, amely mindennapjainkat behálózza, amely 'okos' eszközök használatával, fejlett technológiai megoldásokkal kényelmesebbé és biztonságosabbá teszi életünket.

A rendezvényt az Eötvös Loránd Fizikai Társulat égisze alatt szerveztük, amelyhez csatlakozott az ELTE TTK Fizikai Intézet, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, valamint jelentős anyagi támogatást kaptunk a Tungsram Schröder Világítási Berendezések Zrt. vállalatától.

2015 hivatalosan a *Fény nemzetközi éve*, ezért tematikailag csatlakoztunk a fény témaköréhez. A *fizika mindenkié* rendezvénynek nem volt központi helye, csak az időpontot rögzítettük április 18-ra. Várakozással és izgalommal vártuk a nagy eseményt.

Országos fizikaünnep volt Soprontól Debrecenig, Győrtől Békéscsabáig mintegy 45 helyszínen, 52 tartalmas programmal.

Minden helyszín ugyanolyan fontossággal bír, a programokat a helyi tanár-diák közösség alkotta, építette fel és valósította meg. Minden helyszín és minden program egyedi volt, a több órás, de gyakran egész napos rendezvény sikere nagymértékben a helyi szervezők lelkesedésén, ötletességén múlott.

A fizika mindenkié rendezvényre megmozdult az ország, fizikáról szólt egy nap a kisiskolásoknak, a gimnazistáknak, az egyetemistáknak, a szülőknak és sok esetben a nagyszülőknak is. A nap elteltével, amely sok helyen estébe hajló fesztivállá alakult, megmutattuk, hogy a fizika nemcsak törvények és képletek alkotta halmaz, hanem izgalmas, kézzelfogható,

érdekes jelenségek tárháza, amely lebilincseli a diákokat, felnőtteket.

A legkülönbözőbb programokkal vonzotta a fizika az iskolákba, egyetemekre, parkokba, obszervatóriumba, múzeumokba, rendezvényközpontokba a diák és felnőtt látogatókat. Rendkívül érdekes és látványos kísérletek zajlottak, mint például a folyékony nitrogénes PET palack fröcskölés, szárazjeges autóemelés, szikrázó Tesla-tekerics bemutatás, távcsöves csillagfigyelés, lézeres show, fényfestés, napóra- és periszkóp-készítés, vízi rakéta és camera obscura készítés, élő szivárvány alkotás és még sok más kreatív program. Támogatóknak köszönhetően tematikus világítástechnikai számolások és kísérletek zajlottak több helyen, amelynek mérési jegyzőkönyvei figyelemre méltó pontossággal, dokumentálással készültek el.

A kísérletek során sok vélt-rejtélyre is fény derült, sok kérdésre választ adtunk, mert közérthetően elmondtuk, megmutattuk, megmértük, elmagyaráztuk, hogy milyen csodás a fizika világa. Csillogó szemek – végtelennek tűnő kérdezgetések – sokszorosan megismételt kísérletek! Talán így lehet keretbe foglalni a napot, amelyen országszerte több ezren vettek részt.

A rendezvény <http://afizikamindenkie.kfki.hu> honlapján további érdekes beszámolókat olvashatnak, illetve izgalmas pillanatok fotóit nézegethetik az érdeklődők. Erről a különleges és újszerű kezdeményezésről számos cikk is megjelent a sajtóban, amelyeket ugyancsak e honlapon gyűjtöttünk össze.

Köszönjük a színes programokat, gratulálunk a szervezéshez!

Jövőre újra és még többen fizikázzunk, hiszen a fizika mindenkié!

*Fábián Margit, Cserti József*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

*И. Екель, А. Линднер, А. Рингвальд:* Обнаруживание следов сверхлегкой частиц

*И. Бакоши, Б. Тот, Л. Пэтер:* Изготовление нано-проводок

*Г. Хорват, А. Эри и др.:* Сравнение оптических методов измерения степени облачности – часть первая

*Ж. Регал:* Больше, чем число звезд на небе – часть первая

*А. Борхиди:* Ядерная электростанция Пакш и её окрестности: какие взаимодействия ожидаются?

*М. Фабиан:* Оработна отходов ядерных электростанции – часть первая

*А. Бузяди, Д. Сэго:* Мишликен и его определение элементарного заряда – часть первая

*Г. Раднаи:* А. Фараго – забота от одаренных юных физиков 1925–1939

*Г. Дьёрдьи (1930–1973):* Колебания и корреляция пучков лучей на основании корпускулярной картины

## ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

### КНИГИ

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*Т. Беке:* Использование энергий ветра и солнца как предмет школьных сборников задач

*Н. Бокор:* Венера в спальничей комнате

*Я. Варга:* Физика фокусов

*С. Ж. Инцефи:* Предъявление кривых Лисажу путём показания взаимодействия косо поставленных колебателей

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)

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

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

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

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

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

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



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében

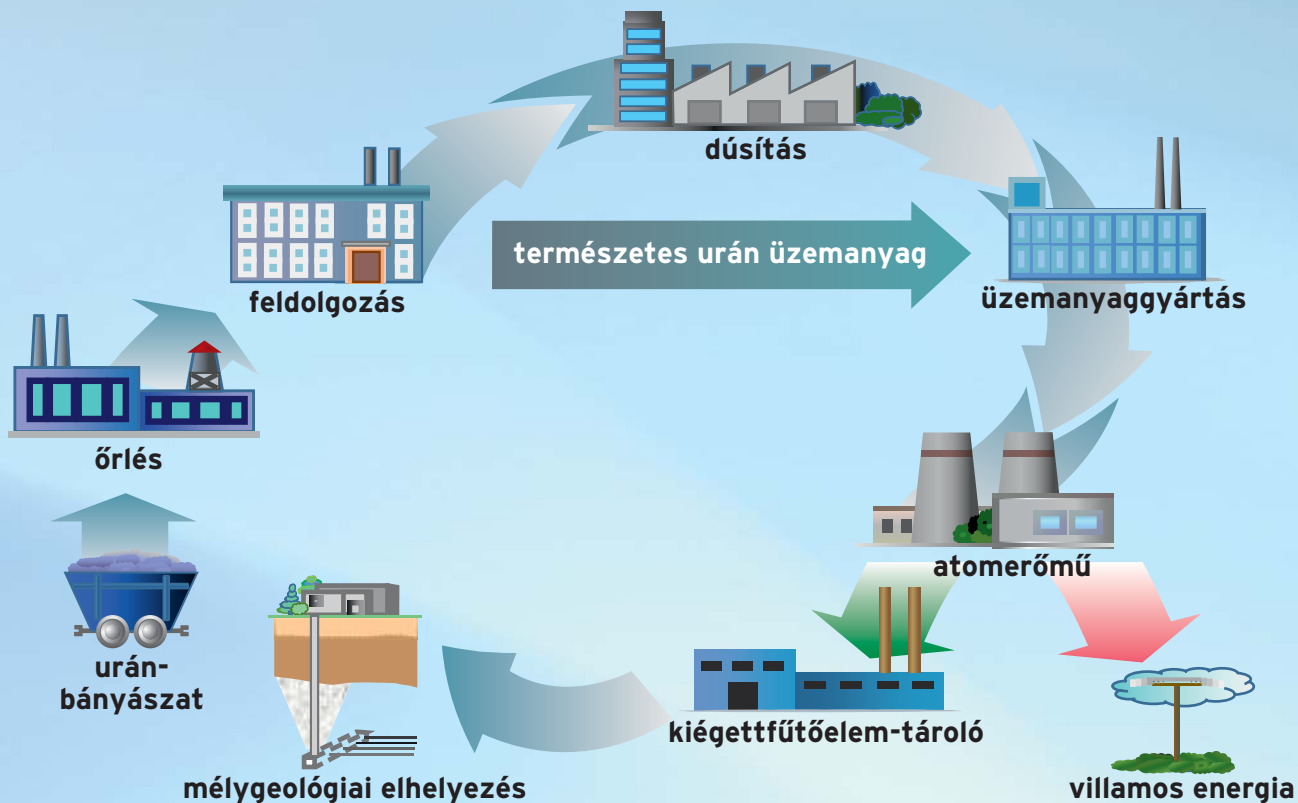


<http://afizikamindenkie.kfki.hu>

Támogatók:



NYÍLT ÜZEMANYAGCIKLUS



ZÁRT ÜZEMANYAGCIKLUS

