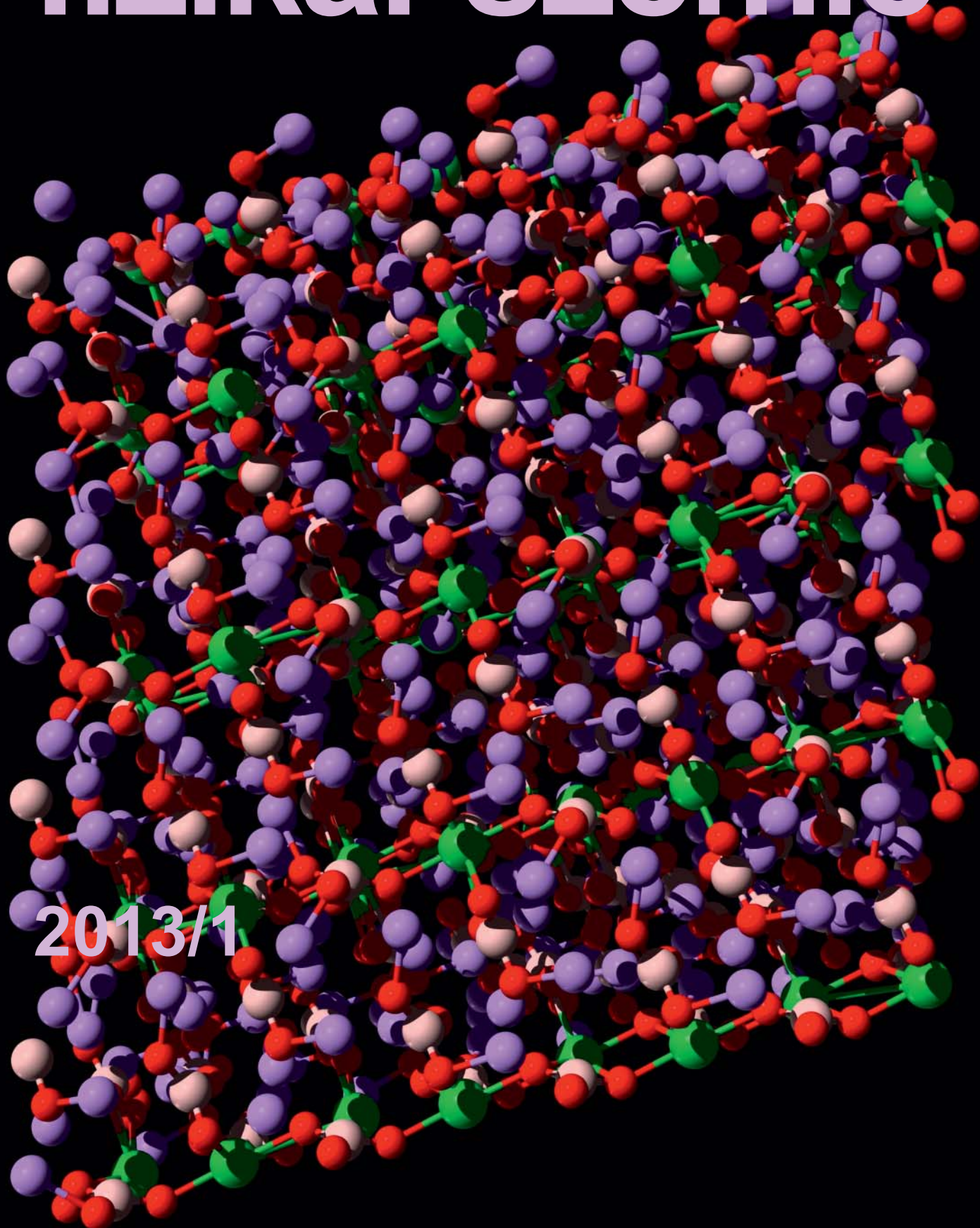


fizikai szemle



2013/1

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

Főszerkesztő:

Szatmáry Zoltán

Szerkesztőbizottság:

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

Szerkesztő:

Füstöss László

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mail címe:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A lítium-itrium-borát kristály
szerkezete (készítette
Lengyel Krisztián).

TARTALOM

<i>Varga Péter</i> : Esszé a mérésekről, amelyek a Planck-törvény felfedezéséhez vezettek – I. rész	1
<i>Kovács László</i> : Eredmények a magyar kristályfizika utóbbi éveiből	7
<i>Kádár György</i> : A hullámfüggvény tudattól független redukciója	10
<i>Horváth Zsuzsa, Érdi Bálint</i> : Exobolygók a fizika érettségien – I. rész	14

A FIZIKA TANÍTÁSA

Károlyházy-feladatok az Eötvös-versenyen – IV. rész, elektromos áram (<i>Radnai Gyula</i>)	18
<i>Láng Róbert</i> : Látogatás a CERN-ben	23
<i>Gallai Ditta</i> : Fizika a János-hegyen	26
<i>Piláth Károly</i> : Egy továbbfejlesztett hullámkád	31

KÖNYVESPOLC

PÁLYÁZATOK

HÍREK – ESEMÉNYEK

<i>P. Varga</i> : On the measurements which led to the discovery of Planck's law – part I	
<i>L. Kovács</i> : Recent successes of Hungarian crystal physics	
<i>G. Kádár</i> : The spontaneous reduction of the wave function	
<i>Zs. Horváth, B. Érdi</i> : "Exoplanets" as a Physics topic of secondary school final exams – part I	

TEACHING PHYSICS

Eötvös Physical Competition problems contributed by F. Károlyházy – part IV, electric current (<i>G. Radnai</i>)	
<i>R. Láng</i> : A visit to CERN	
<i>D. Gallai</i> : Physics competition at János Hill near Budapest	
<i>K. Piláth</i> : An improved laboratory wave pool	

BOOKS, TENDERS, EVENTS

<i>P. Varga</i> : Über die Messungen, die zur Entdeckung des Planckschen Gesetzes führten – Teil I.	
<i>L. Kovács</i> : Neuere Erfolge der ungarischen Kristallphysik	
<i>G. Kádár</i> : Die spontane Reduktion der Wellenfunktion	
<i>Zs. Horváth, B. Érdi</i> : „Exoplaneten“ als Physikthema der Reifeprüfung – Teil I.	

PHYSIKUNTERRICHT

Aufgaben zu den Eötvös-Wettbewerben von F. Károlyházy – Teil IV, elektrischer Strom (<i>G. Radnai</i>)	
<i>R. Láng</i> : Ein Besuch am CERN	
<i>D. Gallai</i> : Physikwettbewerb am János-Berg bei Budapest	
<i>K. Piláth</i> : Ein verbessertes Wellen-Becken	

BÜCHER, AUSSCHREIBUNGEN, EREIGNISSE

<i>П. Варга</i> : Измерения, служащие основами изобретения закона Планка – часть первая	
<i>Л. Ковач</i> : Новые успехи венгерской физики кристаллов	
<i>Г. Кадар</i> : Спонтанная редукция волновой функции	
<i>Ж. Хорват, Б. Эрди</i> : «Экзопланеты» как предмет заключительного экзамена средних школ по физике – часть первая	

ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

Задачи физического конкурса им. Этвеша от Ф. Каройхази – часть четвертая, электрический ток (<i>Г. Раднаи</i>)	
<i>Р. Ланг</i> : Визит в CERN	
<i>Д. Галлаи</i> : Конкурс по физике на г. Янош около Будапешта	
<i>К. Пилат</i> : Новый бак для демонстраций по волнам	

КНИГИ, ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:



Nemzeti
Kulturális
Alap



Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXIII. évfolyam

1. szám

2013. január

ESSZÉ A MÉRÉSEKRŐL, AMELYEK A PLANCK-TÖRVÉNY FELFEDEZÉSÉHEZ VEZETTEK – 1. RÉSZ

Jánossy Lajos emlékének, aki megtanított a kísérleti munka megbecsülésére

Varga Péter
KFKI

Az ezredfordulóval együtt ünnepeltük *Planck* sugárzási törvénye, a kvantumelmélethez vezető első lépés felfedezését. Joggal kapott dicséretet az a spirituális teljesítmény, amely a törvény megalkotásához vezetett, de akkor alig esett szó arról, hogy mekkora jelentősége volt az experimentális munkának. Pedig ahhoz, hogy alapvetően más, a tudomány eddigi eredményeit felülmúló, szinte új világképet követelő ismeretek szülessenek, olyan tapasztalatok kellene, amelyeket eddigi tudásunkkal már nem tudunk megmagyarázni. Planck a törvényét *mérések eredményeinek ismeretében fogalmazta meg*, és egy merőben új feltevés, a kvantumhipotézis alapján értelmezte. Ugyanez történt a századfordulót megelőző évek két nagy felismerésével is: a fotoeffektus vizsgálata során tapasztalt jelenségek magyarázatával (*Einstein*) és a hidrogén-spektrum értelmezésével (*Bohr*). A régi elmélet már nem volt elegendő az új tapasztalatok befogadására, ezért lett szükség új törvényekre. Máskor is így történt. *Newton*hoz *Tycho Brahe* és *Kepler*, továbbá *Galilei* is kellett.

Az évforduló kapcsán a *rációt* ünnepeltük, méltán. Ha szó is volt arról, hogy a kísérlet megelőzte az elméletet, az *empíria* nehézségei már mellékes körülménnyé váltak. Mert mi kellett a méréshez? Csupán egy forrás, amely fekete sugárzást bocsát ki, egy monokromátor, amely elvégzi a spektrális bontást, és egy detektor, amely megméri az adott hullámhosszon az elektromágneses hullámok teljesítményét. A valóságban izgalmas, krímibe illő bonyodalmak árán jutottak el az igazsághoz. Mivel félő, hogy a Tisztelt Olvasó megvárja, amíg a teljes cikk megjelenik, és megnézi a végét, közlöm a célhoz vezető út főbb fázisait.

• 1896: *Wien* közli sugárzási képletét – nem alaptalan megfontolások alapján.

• 1896–1899: *Paschen* a közeli infravörösben végzett mérései során olyan tapasztalati formulához jut, amelyből következik *Wien* sugárzási képlete.

• 1897–1900: *Planck* részletesen tanulmányozza az olyan üreg belsejében kialakuló elektromágneses sugárzást, amikor az üreg belsejében a sugárzással kölcsönhatásban levő rezonátor is van. Fokozatosan előre haladva felírja a sugárzási tér entrópiáját, és egyre meggyőzőbb bizonyítást talál *Wien* sugárzási képletére.

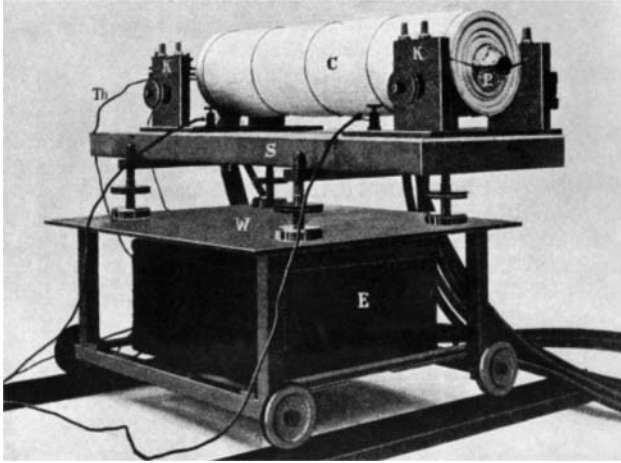
• 1899–1900: *Lummer* és *Prigsheim* izotermákat mérve igazolja, izokromákat mérve cáfolja *Wien* törvényét. A kétféle eredményt nem kommentálják.

• 1900. október: egészen új elven működő, fényerős monokromátor segítségével *Rubens* és *Kurlbaum* kiterjeszti a méréseket a távolabbi infravörösbe. *Wien* formuláját cáfoló eredményt kapnak. *Planck* elfogadja ezt a mérést, és úgy módosítja az entrópia kifejezését, hogy a méréshez illeszkedő formulát kapjon, a *Planck-törvényt*. Baj még mindig van, mert a mérések *Rayleigh* képletével (figyelem, nem a „*Rayleigh*”–*Jeans* törvénnyel) is összhangban vannak.

• 1900. november: *Planck* olyan statisztikus modellet állít fel, amelyben az üregben levő rezonátorok az energiájukat *hν* adagokban veszik fel és adják le, továbbá a rezonátorok még megkülönböztethetetlenek is, mindebből ahhoz az entrópiához jut, amely a *Planck-törvény*hez vezet.

• Az 1900-as év vége: *Lummer* és *Prigsheim* megmutatják, hogy *Rayleigh* képlete nem írja le a sugárzást a közeli infravörös tartományban.

A fekete sugárzás törvénye *alapegyenlet*, amely megadja, hogy egy zárt üregben, amelynek falai azonos hőmérsékleten vannak, hogyan függ az elektromágneses sugárzás spektruma a falak hőmérsékletétől, mint egyetlen paramétertől. Egy alapegyenletet sokféle mó-



1. ábra. Lummer és Kurlbaum feketetest-kísérleti berendezése 1898-ból. Platinahengereket helyeztek kerámiacsövekbe.

don lehet meghatározni, például *tapasztalat* alapján. Az ideális gáz $pV = RT$ törvénye két, már ismert összefüggés, a Gay-Lussac- és a Boyle–Mariott-törvény összesítése. Eljuthatunk az alapegyenlethez *elméleti* úton is, elemi folyamatok általánosítása révén. Végül többekévesébe következetes megfontolások útján a törvény *kitalálható*, és majd a tapasztalat eldönti igaz-e. Akár így, akár úgy jutunk el az alapegyenlethez, meg kell keresni azokat az elemi folyamatokat, amelyek a tapasztalat tárgyához vezetnek. *Maxwell* és *Boltzmann* a mechanikára támaszkodva ezt tették.

Planck a fordított úton próbált haladni. A rendezetlen mozgást végző molekulák helyett elektromágneses, rendezetlenül elnyelődő és kisugárzott hullámok sokaságát vizsgálta. Törekvése nem járt totális kudarccal, de sikerrel sem. Manapság már megemlítik (a szerző diákkorában még nem, és sokáig utána sem), hogy Planck nevezetes törvényét Lummer (1. ábra) és a többiek kísérleteinek eredményei nyomán tapasztalati törvényként írta fel. Azonban Paschen kísérletei, amelyek megelőzték Lummerék munkáját, még a hibásnak bizonyult Wien-formulát igazolták, és Planck nem csupán a teoretikus belső indíttatása alapján próbálta négy év munkájával Wien sugárzási formuláját bebizonyítani (lásd *Simonyi Fizika Kultúrtörténetét*), hanem a kísérleti eredmények hatása is szerepet játszhatott ebben. Azután éppen a kísérleti eredmények hatására tette meg az első lépést az új úton.

Kísérleti fizikus vagyok, ezért élvezettel követtem nyomon az elmélet és a kísérlet izgalmas dialektikáját. Megpróbáltam a kor emberének fejével gondolkodni, és megérteni, miért mozdult az egyik irányba és nem a másikba. Ha meg is indoklom lépéseik okát, következtetésem természetesen visszamenőleges kitaláció.

A történet konklúziója: Egy kísérletet nem lehet befejezni, csak abbahagyni. A Wien-formulát igazoló mérések nem voltak rosszak, csak *kevésék*, de nem a mérés statisztikus vagy szisztematikus hibái, hanem a kiválasztott hullámhossztartomány szűk volta miatt. Ezzel már el is árultam a poént, a Planck-törvény numerikus analízise megmutatja az olvasónak, hol *volt* érdemes mérni. Köz hely, de utólag könnyű okosnak lenni.

A kezdetek (Kirchhofftól Wienig)

Kirchhoff elméleti megfontolásai (nevezhetjük ezeket gondolatkísérletnek is) révén tudjuk, hogy egy zárt üregben – amely falának legalább egy része elnyelő és a fal mindenütt azonos hőmérsékleten van – izotróp és polarizálatlan sugárzás alakul ki, amelynek spektrális összetétele független az üreg alakjától és a falak anyagától. Ezért a sugárzó energia sűrűsége, valamint ennek spektrális eloszlása – a következőkben $u(\lambda, T)$ – kizárólag a hőmérséklet függvénye. Az anyag- és alakfüggetlenség megkönnyíti annak a dolgot, aki az elmélet vagy kísérlet alapján akarja meghatározni a spektrumot, mert elég egy speciális, könnyen kezelhető modellel elvégezni a számolást vagy a mérést, és az eredmény minden más esetben is igaz lesz. (A mérések elvégzésénél már kénytelenek vagyunk engedményt tenni, az üreg falát meg kell furni, hogy a kisugárzott energia áramát mérhesük, a lyukat pedig kicsire kell választani az üreg falának felületéhez képest.)

Kirchhoff amellett, hogy bebizonyította egy ilyen univerzális függvény létezését, felállította a hőmérsékleti sugárzásnak az anyag partikuláris tulajdonságait is tartalmazó fontos törvényét. Legyen $e(\lambda, T; \mathbf{s})d\lambda$ az energiafluxus, amelyet egy T hőmérsékletű, konkrét anyagi tulajdonságokkal rendelkező test az \mathbf{s} irányban a λ és a $\lambda+d\lambda$ hullámhossz-intervallumban emittál, röviden az emisszióképesség. Legyen $r(\lambda, T; \mathbf{s})$ a reflexióképesség, amely azt adja meg, hogy egy adott felület a rá minden irányból beeső energiából mennyit szór vissza az \mathbf{s} irányba (feltételezve, hogy a beeső sugárzás izotróp)! Ezzel Kirchhoff törvénye:¹

$$\frac{e(\lambda, T; \mathbf{s})}{1 - r(\lambda, T; \mathbf{s})} = u(\lambda, T), \quad (1)$$

tehát két mennyiségnek, amelyek az emittáló-elnyelőszóró anyag tulajdonságaitól és a szórás iránytól függenek, hányadosa univerzális függvény, amely már csak a hőmérséklettől és a hullámhossztól függ. Következésképpen egy alakzat, amelyik egyáltalán nem veri vissza a fényt, univerzális sugárzást emittál, amelyet fekete sugárzásnak nevezünk.

A fekete sugárzásra vonatkozó első mérési eredményt *Tyndall* produkálta: megmérte a teljes spektrumban kisugárzott fluxust. A mérés alapján *Stefan* megállapította, hogy a teljes U energia a hőmérséklet negyedik hatványával arányos:

$$U = \sigma T^4. \quad (2)$$

Erre Boltzmann adta az elméleti magyarázatot 1884-ben. Feltételezte, hogy a sugárzás nyomást gyakorol az üreg falára. Egyáltalán, a fénynyomás létezésének feltételezése is merész tett volt. Ugyan következett

¹ Kirchhoff törvényét egyszerűsített alakjában szokták idézni, bár Kirchhoff gondolatkísérleteiből (1) következik [1], és ezt a formáját ki is fogjuk használni.

Maxwell elméletéből, de csak később, 1888–89-ben bizonyította be *Hertz*, hogy elektromágneses hullámok igenis léteznek. Sőt azt, hogy még a fénynyomás is létezik, csak 1900-ban sikerült *Lebegyevnek* kimutatnia.²

A sugárzás spektrumának leírásához vezető úton fontos eredménye volt Wiennek az eloszlási függvény alakjára vonatkozó törvénye. Bebizonyította (1894), hogy a spektrális energiasűrűség

$$u(\lambda, T) = \frac{\text{konst}}{\lambda^5} F\left(\frac{1}{\lambda T}\right). \quad (3)$$

Ezzel Wien szűkítette a lehetséges összefüggések körét, törvényét *eltolási törvénynek* nevezzük. Jelentése: ha egyszer megismerjük az F függvény alakját, mondjuk fix hullámhossz mellett, akkor könnyű átskálázni egy másik hullámhosszra és fordítva. Tehát elegendő egyetlen hullámhosszon vagy hőmérsékleten – elmélet vagy kísérlet alapján – meghatározni, hogyan függ az energiasűrűség a másik, megmaradt változótól. Természetesen a jó fizikus a másik, fixen tartott paramétert ezután megváltoztatja, és megismétli a mérést. Látni fogjuk, hogy így is történt.

A (3) törvényből további két, mérésekkel ellenőrizhető összefüggés születik:

a) Ha az energiasűrűséget a hullámhossz függvényének tekintjük fix hőmérséklet mellett, akkor az energiasűrűség maximumának λ_{\max} helyére fennáll

$$\lambda_{\max} T = A, \quad (4)$$

b) az energiasűrűség maximális értéke

$$u_{\max} T^5 = B, \quad (5)$$

ahol A és B állandók. Mivel a (3) eltolási törvényben nem kételkedünk, a (4) és az (5) összefüggés módot nyújt arra, hogy mérőberendezésünket ellenőrizzük, és még számszerű adatokat is nyerjünk. Ha ezeket nem találjuk állandónak, és bízunk a termodinamikában, akkor a berendezés rossz, ha állandók, akkor talán jó. A későbbiekben ismertetendő spektrális mérések szerzői mind ezzel kezdték, mintegy bemelegítésként. Az ellenőrzést és az adatnyerést megnehezíti, hogy egy szélsőérték helye nehezen mérhető pontosan, a hőmérsékletmérés hibája pedig megszorozódik.

Most már csak az univerzális F függvény alakját kellett megtalálni. Wien ezért továbbmegy, explicit alakban is felírja a törvényt [2]. Dolgozata bevezetésében kijelenti: bár a spektrális energiasűrűség pusztán az elektromágneses elmélet alapján meghatározható, de az erre irányuló tevékenysége nem járt sikerrel.

² Csupán véletlen, de érdekes, hogy Maxwell elektromágneses *hullám* elméletére akkor került fel a végső argumentum, amikor felfedezték az ellenkezőjét. Az már nem véletlen, hogy Hertz a folytonos, elektromágneses hullámok létezését bizonyító mérésekben vette észre elsőként a fotoeffektus hatását.

Ezért fordított eljárást követ: felállít egy hipotézist, azután ennek alapján felírja a keresett formulát, és a tapasztalatra bízva, hogy igazolja vagy megcáfolja a formulát, ezzel verifikálja vagy megdönti a kiinduló feltevést. Nem részletezzük, hogyan jutott el a hipotéziséhez Wien, de az nem volt alaptalan. Végeredményben

$$u(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad (6)$$

ahol c_1 és c_2 állandó. A (6) összefüggést a továbbiakban Wien sugárzási törvényének fogjuk nevezni. *Most már csak a kísérleti fizikusokra vár, hogy igazolják.* Teljes igazolásnak azt tekinthetjük, ha megmérjük az energia vagy azzal arányos mennyiség eloszlását, ha nem is a teljes, végtelen széles spektrumban, de mindenütt, ahol van mérhető spektrális energia. A Wien-törvényből következik az is, hogy a c_2 állandó és az eltolási törvényből kapott (4) összefüggésben szereplő A állandó között fennáll

$$c_2 = 5A. \quad (6a)$$

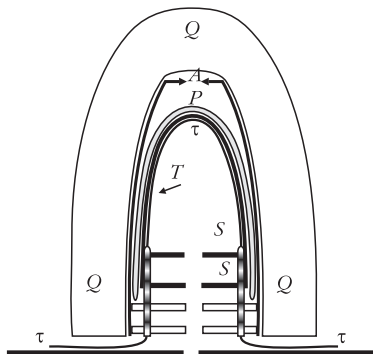
Ez még egy lehetőség az ellenőrzésre, ha a maximum helyének kísérleti megállapítása mellett módot találunk a c_2 állandó mérésére is. Találunk majd erre példát. (Azt viszont ne várjuk, hogy a Planck-törvény majd gyökeresen más eredményt ad mint (6a), mert ez majd csak keveset módosul: $c_2 = 4,965A$, a numerikus tényező eltérése a mérési pontosság határán belül marad.)

Mit, mivel és hogyan kellett mérni?

A sugárzás forrása

Az elméleti fizikus elképzel egy ideális állapotot, amelyben létrejön mindaz, amit tanulmányozni kíván. Nem is tehet mást, mert ha minden mellékkörülményt figyelembe venne, akkor a probléma megoldhatatlanul bonyolulttá válna. A kísérleti fizikus megpróbál olyan körülményeket teremteni, amelyek legalább megközelítik az elmélet kiindulópontjával szolgáló állapotot. Arra is törekszik, hogy mérőeszköze minél egyszerűbb legyen, akkor kevesebb a hibaforrás. A pénz, sajnos mint mindig, kevés. Kényszerű kompromisszumait igyekszik megvédeni.

A legegyszerűbb egy fekete anyagból készített fényforrás, csak arra kell törekednünk, hogy hőmérséklete egyenletes legyen. A recept: végy egy fémszalagot, vigyél fel a szalagra fekete színű anyagot, célszerűen oxidot, mert ez már nem oxidálódik tovább. Izzítsd a szalagot árammal. Célszerű fém a platina, mert ez magas hőmérsékleten sem oxidálódik. A szalag hőmérséklete állandó (a szélektől eltekintve, mert ott a levegő jobban hűti). De nincs olyan anyag, amelyik egy keveset ne reflektálna. A válasz: az nem baj, csak reflexióképessége ne függjön hullámhossztól, akkor *Kirchhoff tétéle* (1) alapján a kisugárzott fény



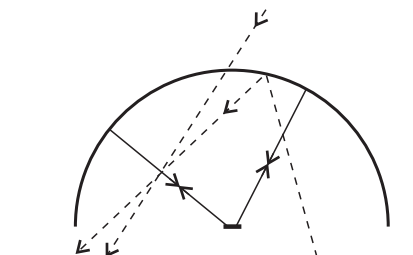
2. ábra. Paschen sugárzó ürege. T réz- vagy platinátégely, ez az üreg fala, S diafragmák ugyanabból az anyagból, P vékonyfalú porcelántégely, A platinafólia, mint elektromos fűtőest, Q azbesztburrok, τ termoelem.

intenzitása arányos a fekete test belsejében lévővel. Viszont azt már tudták, hogy a laboratóriumban elérhető hőmérsékleten izzó testek a legtöbb energiát az infravörös-tartományban bocsátják ki. Tehát azt is fel kell tenni, hogy a reflexió nemcsak a látható tartományban kicsi, hanem az infravörösben is. Szemcsés korom esetén ez a feltevés triviálisnak látszik, de homogén oxidnál – sima felületnél – már nem. (Szerencsére akkor még nem volt aszfaltút sem, mert a fekete aszfalt távolról már csillog, tehát nagy szögű beesésnél tükrözően reflektál.)

Wien és Lummer (elméleti-kísérleti páros!) fekete test után kutatván először szintén fekete szalagra gondolt [3], hiszen látható is volt, hogy a néhány mikron vastag platinaszalagra felvitt kis méretű koromfolt már jobban világít, mint a körülötte levő platina. De azt is észrevették, hogy az izzó hátlap folttal szemben levő része sötétebb lett, mint a környezete. Ugyanis azon a helyen alacsonyabb lett a hőmérséklet, mert az előresugárzó fekete folt jobban hűtötte a szalagot. Mivel a szerzők szerint nem lehetett egyenesen vastag fekete réteget készíteni, az egyszerű megoldást elvetették, és egy érdekes kanyarral tértek rá a jobbra. Példának vették az izzó platinát, amely ugyan jó visszaverő, de: „Ha gondoskodunk arról, hogy a sugárzó test sugárzásának azt a részét, amellyel ez kevesebbet emittál, mint egy azonosan temperált fekete test, pótoljuk a beeső sugárzásból reflektált résszel, akkor ez a teljes sugárzást illetően úgy fog viselkedni, mint egy abszolút fekete test.”

Egy bekezdés erejéig kanyarodjunk vissza Kirchhoffhoz. Ő előbb azt állapította meg, hogy az egyenes falhőmérsékletű üreg belsejében a sugárzás füg-

3. ábra. A feketetest-megoldás a geometriai optika felhasználásával.



getlen az anyag falának anyagától, és innen következett arra, hogy egy test, amely minden hullámhosszon elnyeli a ráeső fényt, csupán a hőmérséklettől függő sugárzást bocsát ki. Majdnem ilyen az az üreg, amelynek falán csak a belső felület nagyságához képest kicsiny lyuk van, mert a kis lyuk csak kevésbé bontja meg az egyensúlyt. Ha pedig kívülről tekintjük a lyukas falú üreget, a lyuk azért látszik feketének, mert a kívülről beeső fényt a fal részben elnyeli, részben szórja. Csak nagyon kevés visszaszórt fény lép ki a kis lyukon, mert a többi az üreg falára esik, itt részben elnyelődik, részben újra szóródik, ebből egy kevés megint kilép, és így tovább. A lyuk majdnem teljesen fekete. (Arról, hogy egy üreg falán levő kis nyílás valóban fekete, érdemes meggyőződni. Ragasztunk össze nagyon feketének látszó papírlapot egy fehérrel, és készítsünk ebből kockát úgy, hogy a fekete oldal legyen kívül. Fúrjunk rá kis lyukat. Látni fogjuk, hogy a nyílás sötétebb, mint a körülötte lévő fekete papír, dacára annak, hogy a belső fal fehér, de nem tökéletesen fehér.)

A követelményeknek megfelelő fekete testet mutatunk be a 2. ábrán [4]. Az üreg falának felülete mintegy 60 cm^2 , a kerek lyuk átmérője 5 mm volt. (Kérem, hogy ezt a méretet jegyezze meg az olvasó!) Az üreg fala réz volt, amelyet fekete oxidréteg takart. Magasabb hőmérsékleten platina kályhát használtak, és vékony falú porcelántégelyt helyeztek belülré. Paschen a hőmérsékletet az üregbe benyúló termoelemmel mérte. A 2. ábrán látható két diafragma egyrészt csökkentette a beeső sugárzást, másrészt meghatározta a kilépő fénykúpot. Bár az árammal izzított fémfóliában az áramsűrűség nem volt homogén, tehát a disszipált hő sem volt az, a hőmérséklet viszont a hővezetés és a sugárzás révén ki tudott egyenlítődni. Erre nézve Paschen közölt egy megnyugtató megfigyelést, ami jó kísérletezőre vall: ha az üregben a sugárzás hőmérsékleti egyensúlyban van a fallal, akkor az üregbe néző megfigyelő nem láthatja a fényes felületű termoelem drójtait. Aki nem tudta, hol van a drót, nem is látta. Úgy látszik, a beavatott látta, vagy látni vélte, de a jó kísérletező nem bízik a saját szubjektumában. (Nehéz megmutatni, hogy valami nincsen.)

Az eszköz eleget tesz a következő kritériumoknak:

- a nyílás mérete jóval kisebb, mint a fal felülete,
- a fal anyaga nem tükröző,
- a fal mindenütt azonos hőmérsékleten van,
- az üregbe kívülről nem juthat be számottevő sugárzás.

Paschen kitalált egy másik fekete fényforrást is [4], amely majdnem pontosan meg is felelt a Wien és Lummer által felvetett követelménynek: a sugárzást, amit a sugárzó felület reflektál, vissza kell juttatni a felületre. A megvalósított modellt több kísérletében ki is használta. Fűtött, vasoxiddal bevont platinaszalagot helyezett polírozott vas félgömb gömbi középpontjába (3. ábra). A félgömb, mint tükör, önmagába képezi le a szalagot, tehát a fény visszajut a forráshoz. Ez zárt út. Ha a félgömb anyagának reflexióképessége 100% lenne, akkor ezt az elrendezést is tekinthetnénk

majdnem zárt üregnek, hiszen nem távozhat belőle energia, csak a gömb tetején a megfigyelésre szánt kis lyukon. Csupán ezt a kis veszteséget pótolná a szál izzítása. Most viszont van veszteség, a tükör melegszik, ezt is kívülről kell pótolni. A külvilág sugárzásától való izoláltság viszont fennáll, mert az a fény, ami kívülről esik be a félgömbre, a visszaverődés után elkerüli a szalagot, és zavartalanul távozik (3. ábra). Ha a fénysugár a megfigyelés oldaláról esik be a lyukon keresztül, akkor meg nem esik az izzó testre, kivéve egy kis térszöget. Azt, ami a kis térszögéből mégis a világító testre esik, azt a szalag diffúz módon szórja. Ezt az elrendezést a továbbiakban optikai feketetestnek nevezzük.

Ha már megvan a sugárzás forrása, mérni kell a hőmérsékletét. Ezt szerencsére pontosan tudták, mert a később ismertetett kísérleteket Berlinben vagy annak közelében végezték. A berlini Physikalisch-Technisches Reichanstalt (Birodalmi Fizikai-Technikai Intézet) egyik fő tevékenysége volt a hőmérsékletmérés módszereinek kidolgozása, és egyes fix pontok elhelyezése az abszolút, *termodinamikai skálán*. (A gáz-hőmérők nem ideálisak, sőt magas hőmérsékleten nem is használhatók.) Viszont, ha már mások megmérték egyes tiszta anyagok olvadás- vagy forráspontját, az már biztos támasz lett az egyszerűbb, könnyen kezelhető hőmérők kalibrálásához. Paschen például víz, kén, anilin forráspontjával, ezüst, arany, palládium és platina olvadáspontjával kalibrálta a termoelemait [4, 5]. Alacsonyabb hőmérsékleten a hőmérséklet stabilitását azzal is elérték, hogy az üreget forrásban levő vízzel, vagy más, kritikus hőmérsékleten levő anyaggal vették körül.

Tegyük fel, hogy van fekete testünk, most már mérni kell, mégpedig az üregben kívül. Mivel a sugárzás homogén, az intenzitás (az energiaáram) spektrális sűrűsége is az. Értéke, ha vákuumban (vagy levegőben) vagyunk

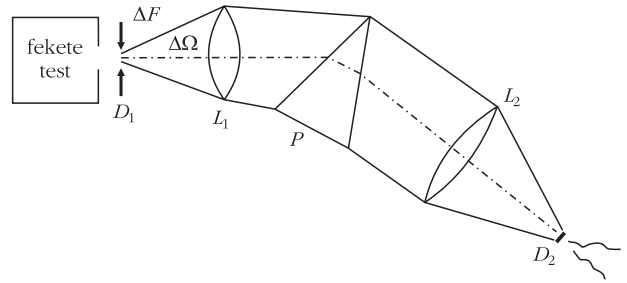
$$i(\lambda, T) = \frac{u[\lambda, T]}{c},$$

ahol c a fénysebesség. Ez az intenzitás lép ki az üregből a falra merőleges irányban. Intenzitás alatt az egységnyi felületen, egységnyi térszögben, egységnyi idő alatt áthaladó, az egységnyi hullámhossz-intervallumhoz tartozó sugárzó energiát értjük. A mérhető mennyiség a fény teljesítménye, amely

$$I(\lambda, T) = i(\lambda, T) \Delta F \Delta \Omega \Delta \lambda, \quad (7)$$

ahol ΔF a feketetest nyílásának az a része, amelyről a sugárzás a detektorra jut, $\Delta \Omega$ az a térszög, amelyen belül az optika összegyűjti ezt a sugárzást, $\Delta \lambda$ az optika által kivágott hullámhossz-intervallum. Mindegyik véges mennyiség,³ a mérés során *állandó értéken kell őket tartani*, ha lehet. Ekkor nem is kell számolni

³ A tankönyvekben inkább a $dF d\Omega d\lambda$ jelölést használják, mintegy szuggerálva, hogy ezek kicsik. Jó is lenne, ha mindig azok lehetnének.



4. ábra. A monokromátor sémája.

velük, csupán arányossági tényezőként szerepelnek. Ha nem, például, ha kicsi a teljesítmény, és ezért megnövelik a felületet (volt erre példa), akkor ezt figyelembe kell venni.

Az optika

Mérni a hullámhossz és a fekete test hőmérsékletének a függvényében kell, ezért az üreg kilépő nyílása és az energiamérő közé monokromátort kell beiktatni. Az izzó testek spektrumának tanulmányozásából tudták, hogy a földön elérhető hőmérsékletek mellett (abban a korban 2000 K alatt) a maximum az 5-10 μm tartományba esik.

Az szerzők keveset írtak az optikáról. Azért próbálom az optikai részleteket rekonstruálni, mert egyes mérések eredményének értékelésénél erre szükségünk lesz. Sőt, a mindent eldöntő méréseknél éppen az optika apparatív problémáinak gyökeres megoldása vezetett eredményhez.

Az infravörös technika különleges eszközöket és anyagokat követelt. Lencse helyett tükröket kellett használni. Prizma céljára kicsi volt a választék, mert a legtöbb elérhető anyag ebben a hullámhossztartományban már erősen abszorbeálja a sugárzást, diszperziója pedig kicsi. Spektrális bontóelemként a kísérletezők káliumklorid- (Sylvin), kalciumfluorid- (folyópát) vagy kőszóprizmát használtak. Ezek értékes, nem kurrens eszközök voltak, és a cikkekben többször is szerepel köszönet a kölcsönadónak, készítőnek. A nagyobb diszperziójú kőso erős higroszkóposága miatt csak kivételesen került felhasználásra.

A kísérletezők – a prizma anyagát kivéve – nem közölték az optikai rész leírását, de azért, hogy a következő tárgyalás egyértelmű legyen, az optikának a 4. ábrán szereplő egyszerűsített sémáját használom. Nem tükrös monokromátort mutatok be, hanem lencsését, mert a bonyolult fényutak követése elvonná az olvasó figyelmét. A lényeg ugyanaz marad. A sugárzás az FT feketetest nyílásán keresztül a D_1 diafragmára vagy résre esik, a továbbiakban ez a belépő diafragma. (Belépő diafragmaként nem lehetett közvetlenül az üreg falán levő lyukat használni, mert a külső fal is sugárzott.) A diafragma mérete a (7) kifejezésben szereplő ΔF . A diafragmáról a fény $\Delta \Omega$ térszögben az L_1 lencsére jut el, majd a közel párhuzamos nyaláb a P prizmára esik. A megfelelő hullámhossz kiválasztása végett a prizmát a papír síkjára merőleges tengely körül forgatni lehet. Az L_2 lencse pedig az eltérített

nyalábot a D_2 detektorra gyűjti össze, ami most a kilépő diafragma. Az optikai rendszer, mint geometriai optikai eszköz, a belépő diafragmát a detektor síkjába képezi le. A detektor felületének célszerűen meg kell egyeznie a belépő D_1 diafragma képével. Ha nem, akkor a kettő közül a kisebbik a meghatározó.

Döntő jelentőségű, hogy mekkorára választhatjuk a belépő diafragma ΔF felületét, mert ezzel is arányos a mért teljesítmény. Mivel mindig van hátér is, a teljesítménynek ezt felül kell múlnia. Nagy ΔF mellett alacsonyabb feketetest-hőmérséklet mellett is mérhetünk. Viszont ΔF azért nem lehet tetszőleges, mert a feketetest nyílásának jóval kisebbnek kell lennie az üreg felületénél. Azért sem lehet nagy, mert a monokromátor kilépő nyílása a belépő képe, és kicsinek kell lennie, hogy megfelelő legyen a hullámhossz felbontása. Végül a $\Delta\Omega$ térszög sem lehet nagy, mert a geometriai optika (az adott esetben a párhuzamosítás és a leképezés) törvényei csak kis térszögekre teljesülnek. Nem is érdemes a homorú tükrök felületét nagyobbra választani, mint a prizma belépő felülete. A prizma tipikus felülete $3 \times 3 \text{ cm}^2$, a tükrök gyújtótávolsága 30 cm volt.

Ezek után mekkora lehetett a belépő/kilépő rés szélessége? A prizma a kilépő síkra kivetíti a spektrumot, a prizma forgatásával ez seper végig a detektoron. Legyen a prizma 60 fokos és a sugármenet a prizma két oldalán közel szimmetrikus (ez az optimális eset)! Az a spektrum, amelyet a monokromátorral felbontottak az ($1 \mu\text{m} - 8 \mu\text{m}$) tartományba esett. A gyakran használt KF_2 kristály törésmutatójának hullámhosszfüggése ismeretében (1,42888, illetve 1,34983 a két határon) kiszámítható, hogy a prizmát 0,055 radiánnal kell a két határ között elfordítani. Ha 30 helyen kívánjuk az intenzitást megmérni, akkor körülbelül 2 milliradiánnal kell a prizmát lépésenként elfordítani. A tükrök tipikus gyújtótávolsága 300 mm volt, ez a szög megfelel 0,6 mm széles résnek, detektornak. *Kéretik ezt az adatot is megjegyezni!*

A mért $J(\lambda, T)$ teljesítményt befolyásolja a monokromátor és a detektor is. Ezért

$$J(\lambda, T) = a(\lambda) b(\lambda) I(\lambda, T), \quad (8)$$

ahol $a(\lambda)$ a monokromátor átvitelét, $b(\lambda)$ a detektor érzékenységét jelöli, mindkettő hullámhosszfüggő lehet. A monokromátor $a(\lambda)$ átvitele elsősorban azért függ a hullámhossztól, mert egyrészt a prizma anyaga is abszorbeál, másrészt a felületek reflexiója is függ a beesés szögétől, a prizma anyagától.

A detektor

Foglalkozzunk a (8) egyenlet bal oldalával is! Fényteljesítményt kell mérni, de ez nagyon kicsi a szokásos teljesítményekhez képest. (Gondoljunk az 1 milliwattos lézerre, milyen intenzív.) Bolométert használtak, egy fekete anyaggal bevont fémszalagot, amely a sugárzás hatására felmelegszik, és ezért ellenállása megváltozik. A mérendő energia kicsi, te-

hát a szalag tömegének is annak kell lennie, ezért a platinaszalag vastagságát 1 mikron körülire választották és az ellenállás változását hídban mérték. Azt is fel kell tenni, hogy a bevonat tényleg fekete vagy szürke, $b(\lambda) = 1$ vagy legalább közel van ehhez az értékhez, és állandó. Máskor a bolométer termoelem volt, amire ugyanez áll.

A spektrum *látható tartományában* nem is kell az intenzitást bolométerrel mérni, dolgunkat megkönnyíti a fotometria, a fényérés. Itt kihasználjuk, hogy a szem eleve nagyon érzékeny a fényteljesítményre, emellett még igen jól meg tudja állapítani, hogy két azonos színű folt megvilágítása egyenlő-e. Mérésnél a mérendő nyalábot és egy stabilan sugárzó lámpa nyalábját egymás mellé vetítjük, az utóbbi intenzitását addig változtatjuk, amíg az egyenlőség nem teljesül. A változtatást adott esetben polarizátorok segítségével érték el: a lámpa fényét előbb polarizálták és egy következő polarizátort forgattak, ehhez csak egy gomb szögállását kellett leolvasni. A fotometrikus mérés relatív pontossága jobb, mint az energiamérőé. *Hátránya*, hogy csak a látható tartományban használható.

Miután tudjuk, mit és hogyan mérünk, felmerül a kérdés: a hullámhossz és a hőmérséklet közül melyiket célszerű paraméterként fixen tartani, és fix érték mellett a másikat változtatni? A paraméter értékét változtatva egy görbesereget vehetünk fel. Izotermákat vagy izokromátákat mérjünk?

1. Az első pillanatban az *izotermákat* választanánk, mert hőmérsékletet csak lassan lehet változtatni, a mérési idő hosszú, és ilyenkor szinte mindig közbejöhethet valami, újra kell a méréssorozatot kezdeni, a hullámhosszat pedig monokromátorunkkal csupán egy csavar forgatásával folytonosan változtathatjuk.

2. Ha az *izokromátákat* választjuk, a hőmérséklet-változtatás lassúságával kapcsolatos nehézség ugyan fennáll, de fix hullámhosszon, hőmérséklet-változtatással végzett mérésnél a (8) egyenlet jobb oldalán szereplő, $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ mennyiségek, valamint a $\Delta\lambda$ sáv szélesség nem változnak, a keresett $I(\lambda, T)$ görbe alakja meghatározható, mint a hőmérséklet függvénye. Ha monokromátorunk beállítása stabil, a hullámhosszak jól reprodukálhatók, akkor mérhetünk állandó hőmérséklet mellett is, az adatokat viszont állandó hullámhossz mentén csoportosítjuk. A kísérletezők ezt nem írták meg, de egyes mérési grafikonokból arra lehet következtetni, hogy így tettek.

A döntő kísérletekben a fix hullámhosszat, az izokromáták módszerét használták.

Irodalom

1. F. Hund: *Einführung in die theoretische Physik*. T.4, Bibliographisches Institut VEB Leipzig, 1950.
2. W. Wien: Ueber die Energievertheilung im Emmissionsspectrum eines Schwarzen Körpers. *Annalen der Physik* 58 (1896) 663.
3. W. Wien, O. Lummer: Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes schwarzer Körper. *Annalen der Physik* 56 (1895) 451.
4. F. Paschen: Ueber die Vertheilung der Energie in Spectrum des schwarzen Körpers bei höheren Temperaturen. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie zu Berlin, 1899, 859 old.
5. F. Paschen: Ueber Gesetzmässigkeiten in den Spektren fester Körper. *Annalen der Physik* 60 (1897) 662.

EREDMÉNYEK A MAGYAR KRISTÁLYFIZIKA UTÓBBI ÉVEIBŐL

Kovács László
MTA Wigner FK SZFI Kristályfizikai Osztály

A Gyulai–Tarján kristályfizikai iskola hagyományait követő MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Kristályfizikai Osztálya fő célkitűzése a gyakorlati felhasználásra alkalmas optikai anyagok előállítása egykristály vagy nanoszemcsés formában, ezek kémiai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata, a felhasználás szempontjából legjobb, kívánt tulajdonságú anyagok előállítása, valamint kristályfizikai és nemlineáris optikai kutatások. A cikk az elmúlt években elért legfőbb eredmények közül válogat, bemutatva a saját fejlesztésű, számítógéppel vezérelt kristálynövesztő berendezést, és az ezzel előállított kristályok kutatásában elért legfontosabb eredményeket és alkalmazásokat.

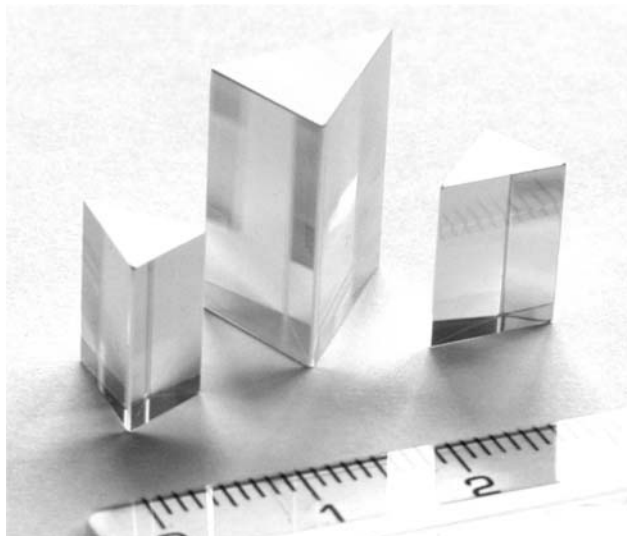
A Gyulai–Tarján kristályfizikai iskola kezdetei a múlt század közepéig nyúlnak vissza [1]. Előbb egyetemi tanszéki kutatócsoportok jöttek létre, majd 1975-ben megalakult az MTA Kristályfizikai Kutatólaboratóriuma *Voszka Rudolf* vezetésével. 1998-ban az intézet, akkor már *Janszky József* irányítása alatt, beolvadt az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetbe. Jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Kristályfizikai Osztályaként él tovább, és a kísérleti fizika egyre nehezedő körülményei között folytatja a Gyulai–Tarján-iskola hagyományait. A fő célkitűzések nem változtak, inkább csak korunk igényeinek megfelelően bővültek: gyakorlati felhasználásra alkalmas optikai anyagok előállítása egykristály vagy *nanoszemcsés* formában, ezek kémiai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata, a felhasználás szempontjából legjobb, kívánt tulajdonságú anyagok előállítása, amit többek között az összetétel, adalékanyagok, és/vagy a hibaszerkezet változtatásával lehet elérni (úgynevezett *defect engineering*). Emellett kristályfizikai és nemlineáris optikai kutatások alkotják az osztály fő profilját. A következőkben az elmúlt évek jelentősebb eredményeiből válogatok, természetesen a teljesség igénye nélkül.

Az optikai egykristályokat főként elektrooptikai, akusztóoptikai, nemlineáris optikai tulajdonságaik miatt használják a lézerfizika különböző területein kutatásban és iparban egyaránt. Technológiai hátterünknek megfelelően elsősorban az 1300 °C alatt kristályosítható anyagok előállításával foglalkozunk, ezek között említendők a niobátok (LiNbO_3 és $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$), borátok (például $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$, $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$), Bi_2O_3 alapú oxidok (például $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, Bi_2TeO_5) és néhány más különleges anyag, mint a ZnWO_4 és TeO_2 . Az optikai egykristályok növesztésére főleg a Czochralski-módszer használatos. A növesztő berendezéseket ma már a reprodukálható méretű és homogén tulajdon-

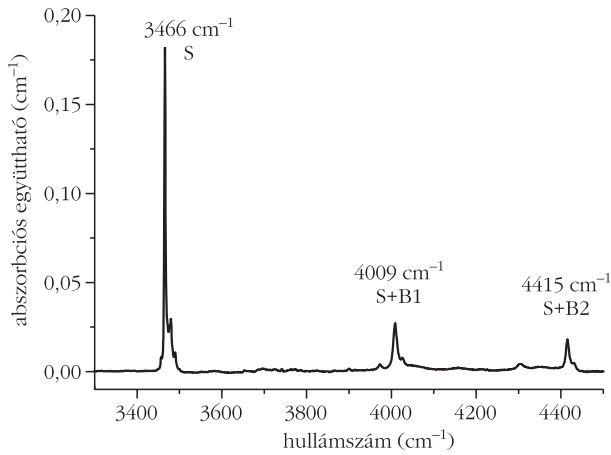
ságú kristályok érdekében az olvadék súlyának mérésére alkalmas digitális mérleggel és számítógéppel vezérléssel látjuk el. Legújabb fejlesztésű berendezésünkkel az inkongruensen olvadó anyagok maggal vezérelt, magas hőmérsékletű oldat-olvadékos módszerrel való növesztése is lehetséges (például sztochiometrikus LiNbO_3 , egyes borát egykristályok). A növesztés teljesen automatizált, a több napos, esetenként több hetes ciklus alatt nincs szükség emberi beavatkozásra, a készülék áram- és vízkimaradás esetére is biztosított.

A LiNbO_3 az egyik legsokoldalúbb egykristály, amelyet újabb és újabb területeken alkalmaznak. Napjainkban nagy energiájú impulzusok keltésére is használják az elektromágneses sugárzás távoli infravörös tartományában. A THz-esnek is nevezett impulzusok lehetővé teszik a kis energiájú gerjesztések dinamikájának nagy időfelbontású vizsgálatát a szilárdtestfizika, kémia és biológia területén. A THz-es képalkotás alkalmazásai a gyógyásztól (alacsony energiája miatt nem ionizál, így kiválthatja a röntgensugaras képalkotást) a biztonságtechnikáig terjednek (fegyver, robbanószer, kábítószer felismerése ruha alatt, csomagban stb.). A Pécsi Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén *Hebling János* csoportja sikerrel alkalmazta a nagy nemlinearitású LiNbO_3 kristályokat THz-es impulzusok előállítására. Ehhez olyan sztochiometrikus összetételű és Mg-ot is tartalmazó kristályokra volt szükség, amelyek a fotorefraktív sűrűlésnek ellenállnak és abszorpciós állandójuk a THz-es tartományban alacsony [2]. Ezeket a kristályokat K_2O -t tartalmazó oldatból, maggal vezérelt, magas hőmérsékletű oldat-olvadékos módszerrel növesztették (1. ábra).

1. ábra. $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ prizmák THz-es impulzusok előállítására.



Készült Tarján Imre centenáriumán, a Magyar Tudományos Akadémián 2012. május 10-én elhangzott előadás alapján.



2. ábra. A LiNbO₃ kristálybeli hidroxidionok nyújtási rezgési sávja a hajlítási rezgésekkel való kombinációkkal (S-nyújtás, B-hajlítás).

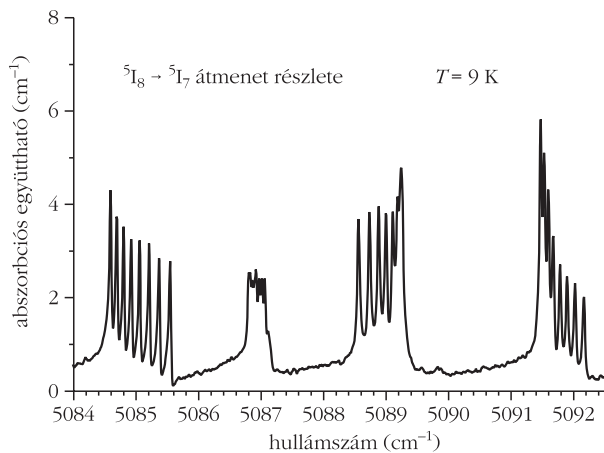
Míg a THz-es alkalmazásoknál káros a fotorefrakció jelensége, a holografikus memóriáknál éppen ezt használjuk ki. Régóta ismert, hogy a LiNbO₃ kristályban található Fe²⁺/Fe³⁺ ionok aránya az egyik legfontosabb paraméter a fény hatására létrejövő törésmutató-változás leírására, de csak ennek segítségével nem sikerült a fotorefrakciós jelenségeket értelmezni. Újabban német együttműködésben tranziens abszorpciós spektroszkópiával vizsgáltuk a gazdarácsban lézerezelt vagy előzetes vákuumbeli redukcióval létrehozható, kispolaronként lokalizált töltéshordozók hopping mozgását. A relaxációs folyamat jellemzésén kívül meghatároztuk az abszorpciós hatáskeresztmetszeteket mind a Nb alrácson mozgó elektronpolaronok (szabad, illetve lítium helyet elfoglaló Nb ionokon kötött polaronok, bipolaronok), mind az oxigénalrácson mozgó lyukpolaronok esetében, ami korábban az abszorpciós sávok átfedése miatt nem volt ismert [3]. Vasat gyakorlatilag nem tartalmazó LiNbO₃ kristályban a kispolaronok révén tranziens hologramokat hoztunk létre. Négyhullámkeveréssel előállított fotorefrakciós törésmutatórác diffrakciós képének láthatóvá tételével sikerült nyomon követni a holografikus rács felépülésének időfejlődését is.

A sztöchiometrikus (Li/Nb = 1) összetételű LiNbO₃ kristályok a hagyományosan növesztett kongruens (Li/Nb = 0,945) kristályokhoz képest számos egyéb kedvező tulajdonsággal is rendelkeznek, ami a rendezett, kevés kristályhibát tartalmazó szerkezetnek tulajdonítható. Ilyen például az abszorpciós él mintegy 20 nm-es eltolódása az ultraibolya tartomány felé, vagy a ferroelektromos domének átfordításához szükséges elektromos tér két nagyságrenddel való csökkenése ($E \approx 200$ V/mm). A kristályhibák spektroszkópiai jellemzői is kedvezően módosulnak: a mért jelek félértékszélességének elkeskenyedése számos új jelenség megfigyelésére nyújt lehetőséget. A kristályokba beépült hidroxidion (OH⁻) szennyezők esetében – amelyek fontos, de még nem kellően tisztázott szerepet játszanak a holografikus tárolási folyamatokban is – a nyújtási rezgési sáv mellett két melléksávot is találtunk, amelyek értelmezését a sű-

rűségfüggvény-elmélettel számolt potenciálfelületre lehetősé. Eszerint a nyújtási rezgés mellett két egymásra merőleges hajlítási módus is megjelenik, amelyek számított frekvenciája kitűnő egyezést mutat a kísérletekkel [4] (2. ábra).

A kálium lítium niobát (K₃Li₂Nb₅O₁₅, KLN) kristályok előállítása során sikerrel hasznosítottuk a K₂O oldatból növesztett sztöchiometrikus LiNbO₃ esetében a K₂O-Li₂O-Nb₂O₅ hármas rendszerről szerzett ismereteinket. A ferroelektromos és elektrooptikai tulajdonságokkal rendelkező, tetragonális volfrámbronz szerkezetű KLN jól használható a 800-900 nm-es lézerdiodák fényének frekvenciakétszerezésére, azaz kék lézerefény előállítására, nem kritikus fázisillesztéssel. Emellett a KLN kristályok alacsony frekvenciáknál relaxor tulajdonságokat mutatnak, magas dielektromos állandóval rendelkeznek és alkalmasak lehetnek az ólomtartalmú kerámiák kiváltására piezoelektromos eszközökben, elektromechanikai jelátalakítóknál. Célunk az volt, hogy a K₂O-Li₂O-Nb₂O₅ hármas rendszerben megállapítsuk a KLN létezési tartományát és elkészítsük a kristály hibaszerkezeti modelljét. A KLN nem olvad kongruensen, a kristály összetétele erősen különbözik az olvadék kiindulási összetételétől és a növesztés során folyamatosan változik is, ami együtt jár a kristály egyes tulajdonságainak változásával. Számos fizikai módszer alkalmazásával (ultraibolya és infravörös abszorpciós spektroszkópia, Raman-szórás, dielektromos állandó mérés stb.) megállapítottuk, hogy bizonyos tulajdonságok csak a kristály Nb-tartalmától, pontosabban a Li-helyeket is elfoglaló Nb-ok mennyiségétől, míg mások a K/Li aránytól is függenek. A módszerek kombinálásával megoldottuk a kristály összetételének roncsolásmentes meghatározását, és a kísérletekkel jól egyező hibaszerkezeti modellt állítottunk fel, amelyet alkáli homológok beépülésének vizsgálatával igazoltunk [5]. Ezen ismeretek segítségével lehetőség nyílt az adott alkalmazáshoz optimális tulajdonságú kristályok előállítására.

A niobátok mellett a változatos összetételű és kristályszerkezetű, kitűnő nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkező borátok kutatásában értünk el jelentős eredményeket. A borát egykristályokat lézerezéssel szembeni ellenálló képességük és a távoli ultraibolya tartományban mutatott áteresztő-képességük teszi alkalmassá a Nd:YAG lézer magasabb, akár ötödik felharmonikusának előállítására is. Kidolgoztuk az α - és β -bárium metaborát (BaB₂O₄, BBO), a lítium tetraborát (Li₂B₄O₇, LTB), a lítium triborát (LiB₃O₅, LBO), a cézium lítium borát (CsLiB₆O₁₀, CLBO), az ittrium és gadolínium alumínium borát (YAl₃(BO₃)₄, YAB; GdAl₃(BO₃)₄, GAB) és legújabban a lítium ittrium borát (LiY(BO₃)₃, LYB) és lítium gadolínium borát (Li₆Gd(BO₃)₃, LGB) növesztési technológiáit. A YAB és LYB kristályokba az ittrium ionok helyére könnyen lehet nagy koncentrációban lézeraktív ritkaföldfémeket beépíteni (például Nd, Er, Yb), így ezek alkalmasak különböző hullámhosszú, belső frekvenciakétszerezéssel vagy felkonvertálással akár az



3. ábra. Hiperfinom kölcsönhatás a YAB:Ho kristályban.

ultraibolya tartományban sugárzó lézerek előállítására is. A borátkristályokat még sok egyéb alkalmazás mellett szövetekvivalens termolumineszcens doziméterként (LTB), szcintillátoranyagként vagy neutrondetektorként is használják (LGB:Ce).

Az egykristályok növesztési technológiájának kidolgozásán kívül foglalkozunk kristályfizikai és spektroszkópiai kutatásokkal is. Míg a YAB és GAB kristályok általában R32 tércsoportú trigonális rendszerben kristályosodnak, bizonyos növesztési feltételek (hőmérséklet, adalék) teljesülése esetén előállhat a kristály monoklin szerkezetben is. Elméletileg kimutatták, hogy a borátoknál létezhet az elemi cellában 8 molekulát tartalmazó C2/c monoklin szerkezet is, amelyet mi a GAB:Tb,Eu kristályban elsőként kísérletileg is megfigyeltünk [6]. Ez a jelenség, amit a kristálytanban *politípiának* hívnak, a polimorfia azon speciális esete, amikor ugyanaz a vegyület úgy kristályosodik különböző szerkezetekben, hogy a közel azonos szerkezeti rétegek csak a rétegződési sorrendjükben különböznek. A borátok optikai és EPR-spektroszkópiájában ezért eredményeinkre példa a LTB termolumineszcens doziméterben alkalmazott Cu-aktivátor UV-tartományba eső második gerjesztési sávjának hozzárendelése és beépülésének értelmezése a kevésbé stabil Li alrácspan [7].

A kvantumfizika eddig főként mikroszkopikus skálán lezajló folyamatok leírására korlátozódott. Újabban azonban már optikailag gerjesztett atomi sokaságokban is demonstrálták a makroszkopikus összefonódottságot. Az úgynevezett koherens optikai folyamatok vagy rezonáns jelenségek megfigyeléséhez már nemcsak atomi gőzöket, ultrahideg gázokat, hanem ritkaföldfém-ionokkal adalékolt kristályokat is használnak. Ezen jelenségek megértéséhez mindenekelőtt szükség van a ritkaföldfémek energianívóinak kristálybeli pontos ismeretére. A 3. ábra a holmiummal adalékolt YAB kristály nagyfelbontású spektrumának egy részletét ábrázolja, ahol az ittriumot helyettesítő Ho^{3+} ionok $^5\text{I}_8 \rightarrow ^5\text{I}_7$ átmenetének Stark-nívói láthatók a D_3 -szimmetriájú kristálytérben. A Stark-nívók további felhasadását a ^{165}Ho izotóp $I = 7/2$ -es magspinjével való hiperfinom kölcsönhatás okozza [8].

Rezonáns optikai jelenségek vizsgálatához növesztettük az erbiummal vagy itterbiummal adalékolt LYB kristályokat is, amelyek monoklin szerkezetben, $P2_1/c$ tércsoportban kristályosodnak. Elektron paramágneses rezonancia, abszorpciós és lumineszcencia spektroszkópiai módszerekkel vizsgáltuk az Er^{3+} ionok kristálybeli beépülését. Az alacsony szimmetria miatt az Er^{3+} ionok degenerált nívói felhasadnak, abszorpciós mérésekkel 20 multipliett 90 Stark-komponensét azonosítottuk. Az itterbium esetén a $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ optikai átmenet pumpapróba módszerrel meghatározott homogén vonalszélességére kapott 1 MHz körüli érték biztató a különböző rezonáns optikai folyamatok létrehozására nemcsak LYB:Yb-ban, hanem más ritkaföldfémekkel adalékolt LYB kristályban is.

A lézerek mellett az oxidkristályok egy másik fontos alkalmazási területe az elektromágneses sugárzások, különösen a röntgen- és γ -sugárzások detektálása. A széles körben elterjedt bizmut-germanátot és a különböző volframát kristályokat újabban előnyösebb tulajdonságaik miatt a cérummal adalékolt lutécium ortoszilikát Lu_2SiO_5 (LSO) és lutécium ittrium ortoszilikát $\text{Lu}_{2-x}\text{Y}_x\text{SiO}_5$ (LYSO) szcintillátorok váltják fel az orvosi képalkotó berendezések detektoraiban. Ezek egykristályainak előállítása a magas olvadáspont miatt technológiailag rendkívül nehéz és költséges, így különös figyelmet szentelünk az alacsony hőmérsékletű hidrotermális, szol-gél, és mechanokémiai preparációs módszereknek, amelyekkel az anyag nanoszemcsés formában történő előállítása új alkalmazási lehetőségeket ígér.

Az említettekén kívül foglalkozunk még optikai hullámvezetők ionimplantációs előállításával és vizsgálatával, nanoporok kutatásával, környezetvédelmi analitikai vizsgálatokkal stb. A felsorolt példák közül látható, hogy bár a kristályokat elsősorban gyakorlati felhasználás céljára készítjük, ugyanakkor igyekszünk az alkalmazásorientált kutatást a szilárdtestfizikai és anyagtudományi alap kutatásokkal harmonikus kölcsönhatásban végezni. Kutatásainkat elsősorban OTKA-pályázatokból finanszírozzuk, jelenleg négy futó pályázatban veszünk részt. Emellett számos kétoldalú nemzetközi szerződés segíti a világszínvonalú kutatási infrastruktúrához való hozzáférésünket. Bekapcsolódtunk több nemzetközi szervezet, legújabbban a Berlinben megalakult Európai Kristálynövesztési Hálózat (ENCG) munkájába. A hazai egyetemek és kutatóintézetek mellett külföldi intézmények a CERN-től a Massachusetts Institute of Technology-ig (MIT) alkalmazzák kristályainkat technológiai fejlesztéseik során. A nemzetközi elismerést jelzi az általunk szervezett számos workshop, network és konferencia népszerűsége a világ kutatóinak körében. A 2010-ben Pécsen rendezett 11. Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials konferenciára a világ több mint 30 országából több mint 200 résztvevő jött el. A Gyulai-Tarján-iskola továbbélését a kristályfizika csodálatos világa iránt érdeklődő, tehetséges PhD-diákok oktatása biztosítja.

Irodalom

- Hartmann E.: Tarján Imre a magyar kristályfizikában. *Fizikai Szemle* 62/7–8 (2012) 230–233.
- L. Pálfalvi, J. Hebling, J. Kuhl, Á. Péter, K. Polgár: Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO₃ in the THz range. *Journal of Applied Physics* 97 (2005) 123505.
- C. Merschjann, B. Schoke, D. Conradi, M. Imlau, G. Corradi, K. Polgár: Absorption cross sections and number densities of electron and hole polarons in congruently melting LiNbO₃. *Journal of Physics Condensed Matter* 21 (2009) 015906.
- V. Szalay, K. Lengyel, L. Kovács, V. Timón, A. Hernández-Laguana: Vibrations of H^(D) in stoichiometric LiNbO₃ single crystal. *Journal of Chemical Physics* 135 (2011) 124501.
- Á. Péter, I. Hajdara, K. Lengyel, G. Dravecz, L. Kovács, M. Tóth: Characterization of Potassium Lithium Niobate (KLN) Ceramic System. *Journal of Alloys and Compounds* 463 (2008) 398–402.
- E. Beregi, I. Sajó, K. Lengyel, P. Bombicz, M. Czugler, I. Földvári: Polytypic modifications in heavily Tb and Eu doped gadolinium aluminum borate crystals. *Journal of Crystal Growth* 351 (2012) 72–76.
- G. Corradi, V. Nagirnyi, A. Kotlov, A. Watterich, M. Kirm, K. Polgár, A. Hofstaetter, M. Meyer: Investigation of Cu doped Li₂B₂O₇ single crystals by EPR and time resolved optical spectroscopy. *Journal of Physics Condensed Matter* 20 (2008) 025216.
- A. Baraldi, R. Capelletti, M. Mazzera, N. Magnani, I. Földvári, E. Beregi: Hyperfine interactions in YAB:Ho³⁺: A high resolution spectroscopy investigation. *Physical Review B* 76 (2007) 165130.

A HULLÁMFÜGGVÉNY TUDATTÓL FÜGGETLEN REDUKCIÓJA

Elfogult sorok Károlyházy Frigyesről

Kádár György
MTA TTK MFA

Egyik barátom, kinek apja a 40-es években piarista diák volt, azzal fordult hozzám, fizikushoz, hogy *Károlyházy Frigyes*t, apja gimnáziumi osztálytársát II. kerületi díszpolgári címre javasolhatnánk. Azt hiszem magamról, hogy meg tudom ítélni az emberek intellektuális szintjét, Károlyházy Fricit a magas szellemi képességű emberek között tartottam számon, szívesen elvállaltam a díszpolgári címre felterjesztés összeállítását, pedig akkor még nem is ismertem a gravitáció és a kvantumelmélet kapcsolatáról írt cikkét, az abban megfogalmazott zseniális gondolatokat.

Károlyházyt az 1960-as évek közepén az Eötvös Loránd Tudományegyetemen láttam először közelebbről a fizikushallgatók számára is meghirdetett speciális kollégiumának hallgatása idején. Olyan példákkal és hasonlatokkal tudta elmagyarázni a kvantumelmélet és a relativitáselmélet józan paraszti ésszel tulajdonképpen összeférhetetlen kísérleti tényeit és azok elméleti értelmezését, hogy a hallgatóság meg tudta győzni önmagát, hogy ezek a bonyolult, de szigorú kísérleti mércék szerint is érvényes fizikai tények és levezetések mégis össze tudnak férni a magasabb szempontok síkjára felemelt józan paraszti ésszel.

1966 óta háromszor láttam viszont, két alkalommal előadásain a hallgatóság soraiban ülve, személyes kapcsolat nélkül, egyszer egy klubeseményen megkezdett, sajnos folytatás nélkül maradt személyes beszélgetésünk alkalmával.

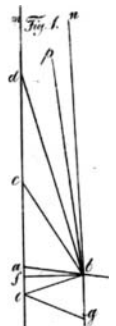
Legalább húsz éve már, hogy Károlyházy egy pesti kis könyvtárban szinte csak nyugdíjas hallgatóságnak *Bolyai János*ról tartott előadást. Erről élesen bennem maradt az előadás néhány mondata, visszatekintve mintha önmagáról beszélt volna, megpróbálom hozzávetőlegesen visszaidézni: „Szinte megható, hogy Bolyai mennyire nem törődött önmaga és mondanivalója népszerűsítésével. Hiszen az *Appendix* bevezetéseként leírhatta volna, hogy évtizedig küzdöttem a paralellák tételével és ugyan nem jutottam eredmény-

re, de közben rájöttem, hogy van olyan geometria, amely a párhuzamosok tétele nélkül is megáll a lábán. Ez az *Appendix*ben közölt tanulmány ezen új geometria leírása.” És ilyen bevezető magyarázat után folytathatta volna azzal, amivel valójában elkezdte, ahogy rögtön belevágott: „Si rectam \tilde{am} non secet plani ejusdem recta \tilde{bn} , et secet quaevis \tilde{bp} (in \tilde{abn}): designetur hoc per $\tilde{bn} \parallel \tilde{am}$.” vagyis „Ha az \tilde{am} egyenest nem metszi ugyanazon sík \tilde{bn} egyenese, és metszi bármelyik más (az \tilde{abn} szögbe eső) \tilde{bp} : akkor ez $\tilde{bn} \parallel \tilde{am}$ módon jelöltetik.” (1. ábra)

Carl Friedrich Gauss időben felismerte Bolyai János munkájának jelentőségét, és *Bolyai Farkas*nak írt levelében meglehetősen kétértelműséggel fejezte ki elismerését: „... Fiaid munkájáról: ... nem szabad dicsérnem, ... ha dicsérném, akkor magamat dicsérném...”. Gauss leírja, hogy 30-35 évvel korábban ő már ugyanezeket az eredményeket végig gondolta, de a kortársait nem tartotta képesnek gondolatai befogadására, ezért nem írta le, és nagyon örvend annak, hogy éppen régi barátjának fia előzte meg a közlésben. Bolyai Jánost lesújtotta ez a levél, egyrészt azért, mert Gauss kétségbe vonni látszott az ő időbeli elsőbbségét, másrészt azért, mert a nagy tekintélyű tu-

1. ábra. Bolyai *Appendix*ének idézett részlete és a hozzá tartozó ábra.

§ 1. (Fig. 1.) Si rectam \tilde{am} non secet plani ejusdem recta \tilde{bn} , at secet quaevis \tilde{bp} (in \tilde{abn}): designetur hoc per $\tilde{bn} \parallel \tilde{am}$. Dari talem \tilde{bn} , et quidem unicam, e quovis puncto b (extra \tilde{am}), atque $\tilde{bam} \neq \tilde{abn}$ non $\angle 2R$ esse patet; nam \tilde{bc} circa b mota, donec $\tilde{bam} \neq \tilde{abn} = 2R$ fiat, \tilde{bc} ex \tilde{am} aliquando primum exit, estque tunc $\tilde{bc} \parallel \tilde{am}$. Nec non patet esse $\tilde{bn} \parallel \tilde{em}$, ubi vis sit e in \tilde{am} (supponendo in omnibus talibus casibus esse $\tilde{am} \angle ae$). Et si, puncto c in \tilde{am} abeunte in infinitum, semper sit $cd = cb$: erit semper $cd = (cb) < (nbc)$; ast $nbc \sim a$; adeoque et $adb \sim a$.



dós a kortárs matematikusok érettségének hiányára hivatkozva nem akarta őt a névtelenségből kiemelve nyilvánosan elismerni. Csoda, hogy 1832 után még több mint 30 vagy 50 év kellett Bolyai munkája jelentőségének felismeréséhez?

Másodszor 2007 februárjában láttam viszont Károlyházyt amikor egy előadást tartott a Műegyetemen, a Szkeptikus Konferencián *Tündérkert – egy kis időtöltés a téridőn* címmel. Az előadás videofelvétele ma is megtekinthető, és érdemes is megtekinteni a következő internetes honlapon: http://videotorium.hu/hu/recordings/details/252,Tunderkert_egy_kis_idotoltes_a_teridon. Egyetemi tanulmányaim óta úgy tudom, hogy a fény sebessége nem függ a fényforrás sebességétől, minden inerciarendszerben azonosan kerekén $3 \cdot 10^8$ m/s. Ez igaz is, ha az anyagtól független háromdimenziós térbeli távolságok és a mindentől függetlenül hőmpolygó idő mérésének *Einstein* előtti hagyományos módszerét alkalmazzuk. Ez az a határsebesség, amely a sebesség-összeadás relativitáselméleti képlete szerint elérhetetlen, felülmúlhatatlan. Károlyházy Frigyes „tündérkerti” előadásában egy szokatlan, de logikus nézőpont szerint az inerciarendszerek egymáshoz viszonyított sebességére ívhosszal mért új definíciót alkalmazva kimutatta, hogy a négydimenziós téridő fogalmi keretében a fény relatív sebessége bármilyen fényforráshoz, véges sebességű inerciarendszerhez képest végtelen. Elmagyarázta, hogy egy álló inerciarendszerben elindíthatunk egy véges relatív sebességű másik inerciarendszert (rakétát), ugyanabban az időpontban ebben is elindíthatnak egy önmagához képest ugyanolyan véges relatív sebességű rakétát, amely ugyanakkor elindíthat egy harmadikat, az egy negyediket, és így tovább. Bemutatta, hogy ezzel a gondolatkísérlettel végtelen számú előzőhöz képest azonos relatív sebességű rakéta indítása esetén sem érhetjük el a fénykúpot, ezért a fény sebességét a téridőben végtelennek kell tekintenünk. A látszólagos ellentmondás magyarázata a nézőpontok különbözősége, a hagyományos Minkowski-fénykúp felülmúlhatatlan sebessége tekinthető végtelen nagy sebességnek is.

Ugyanezen előadás befejező mondatai rávilágítottak Károlyházy véleményére a felületes tudással áltudományos téveszmék rabságába ragadt jóindulatú emberekről, a tudomány komoly művelőinek ilyen emberekhez való viszonyáról. Arról beszélt, hogy mélyen átgondolt tudás és az átadás képességével együtt elsajátított ismeretek nélkül nincs jogunk az „örökmozgó hívőket”, vagy a józan paraszti ésszel nehezen felfogható relativisztikus és kvantumfogalmak naív „reformátorait” bírálni, netán lenézni. Meg kell próbálni a valódi tudást ilyen naív jóindulatú embereknek is hitelesen elmagyarázni. Hozzá kell tennem, hogy az „égő vizes” vagy „szénből vasat konyhai mikróban alkímizáló” hivatásos szélhámosok esete nem ide tartozik.

Utoljára 2011 márciusában láttam Károlyházy Fricit egy klubrendezvényen. A szünetben odamentem hozzá, bemutatkoztam, mire legnagyobb csodálkozásomra kiderült, hogy tudja, ki vagyok. Nem tagadhatom,

hogy ez nagyon jól esett, hiszen korábban személyes kapcsolatunk nem volt, ám ő figyelemmel kísérte a fizikával kapcsolatos eseményeket és embereket. Jó negyedórát beszélgettünk, kiderítettük, hogy a közoktatás ügyében is, és egyéb ügyekben is hasonlóképpen látjuk a világ folyását.

Károlyházy Frigyesben évtizedekig a nehezen felfogható modern fizikai elméletek tényeit és értelmezését zseniálisan megvilágosító egyetemi tanárt, pedagógust, az *Igaz Varázslat* című könyv szerzőjét, számos fizikatanári ankét előadóját, évtizedekig az Eötvösversenyek feladatszerkesztő és bíráló bizottságának tagját, a *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok* (KöMaL) munkatársát ismertem és tiszteltem. A fizikával foglalkozó magyarok között végzett amatőr közvélemény-kutatási eredményeim szerint Károlyházyra sokan emlékeznek, de hozzám hasonlóan tanári, pedagógusi, ismeretterjesztő munkáján túl kutatómunkájának eredményeit csak nagyon kevesen ismerik.

2012 tavaszán azonban elvállaltam a II. kerületi önkormányzat előtt kítüntetésének az előterjesztését és a „II. Kerületért” emlékérmét meg is ítélte neki az önkormányzat (azért nem a díszpolgári címet, mert *Bitskey Tibor* színész személyében szélesebb publicitásnak örvendő vetélytársa támadt). A kítüntetés átadásán 2012. június 21-én már nem tudott részt venni, azt fia vette át, ő pedig július 2-án meghalt, július 24-én eltemették.

A kítüntetésre való előterjesztés elkészítése során kíváncsi lettem tudományos kutató munkássága egyéb adataira is. Könnyen kiderült, hogy Károlyházy Frigyes egy 1966-ban született cikkében [1] a relativitáselmélet és a kvantumelmélet kapcsolatáról mindenkinél korábban közölt alapvető „bizonytalansági relációt” a téridő ívhosszára vonatkozóan, és tett javaslatot a kvantummechanikai állapotfüggvény mérési eljárástól független redukciójára, összeomlására. A „Web of Science” adatbázis szerint erre az amerikai tanulmányút ideje alatt végiggondolt cikkekre 1975 óta máig 200 hivatkozást kapott a nemzetközi szakmai irodalomban. Ugyanebben a témában továbbhaladva írta és védte meg „nagydoktori” dolgozatát [2] 1972-ben.

Amerikai tanulmányútja után történt, hogy *Richard Feynman* Magyarországra látogatott, az Eötvös Társulat látta vendégül. *Nagy Károly*, professzor az ELTE rektora és az elméleti fizika tanszék vezetője Károlyházyra, Amerikát járt munkatársára bízta a nagyhírű vendég kíséretét, hiszen az amerikai kiejtésű angol nyelvről a többieknek akkor kevés tapasztalata volt. Károlyházy beszélt a munkájáról Feynmannak, aki Nagy Károly szavai szerint úgy reagált, hogy a kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet kapcsolatának kutatásába már sokkal jelentősebb tudósoknak is beletörött a bicskája, nem érdemes ezzel foglalkozni. Talán ez a találkozás is hozzájárult ahhoz, hogy ezután Károlyházy Frici nem törődött eléggé önmaga és alapvető mondanivalója népszerűsítésével, inkább az általános fizika korszerű oktatása és népszerűsítése terén vállalt missziós küldetést. Csoda, hogy 1966 után még 2 évtized kellett munkája jelentőségének felismeréséhez?

A fentebb említett cikkek, a *Nuovo Cimento*-ban és *Magyar Fizikai Folyóiratban* megjelent közlemények az általános relativitáselméleti gravitáció és a kvantummechanika kapcsolatának kérdésében tesznek alapvető megállapításokat. Ez a kérdés csak két évtizeddel később, az 1980-as években jött „divatba”, az ebben a témakörben szervezett oxfordi nemzetközi konferencián Károlyházy társszerzőkkel, *Frenkel Andorral* és *Lukács Bélával* együtt bemutatta eredményeit. 1986-ban megjelent közleményük [3] nyomán indult el az 1966-os *Nuovo Cimento* cikkekre való hivatkozások számának növekedése.

Jól ismert tény, hogy a gravitáló tömegek téridőt meggörbítő hatásának tárgyalására megalkotott általános relativitáselmélet a klasszikus fizika csúcspontjának minősíthető, a kísérleti adatokat nagy pontossággal reprodukáló, igen hatékony elmélet. Hasonlóan nagy hatékonysággal működik az atomi és szubatomi részecskéket és azok kölcsönhatásait tárgyaló kvantumelmélet. Az a baj, hogy a relativitáselmélet egzaktsága nem veszi figyelembe a hely és az impulzus (és más kanonikusan konjugált pár fizikai mennyiségek) heisenbergi bizonytalanságát, a kvantumelmélet pedig nincs tekintettel a gravitációs kölcsönhatásra, arra, hogy a téridőt a tömegek hogyan görbítik meg. A kérdés lényegét másként úgy is meg lehet fogalmazni, ahogy Károlyházy disszertációjának címe sugallja: hogyan kell elképzelni az átmenetet az atomi részecskék és a makroszkopikus tömegű testek kvantummechanikai kezelése között.

Két fontos mondanivalója és eredménye van Károlyházy 1966-os cikkének és 1972-es disszertációjának, ezen eredmények lényegét a *Fizikai Szemle* szeptemberi számában [4] Frenkel Andor kitűnően és lényegre törően foglalta össze.

Az egyik a relativisztikus téridő ívhosszának kvantummechanikai eredetű bizonytalanságát leíró képlet. Az angol nyelvű szakirodalomban meghonosodott a „Károlyházy uncertainty relation – Károlyházy bizonytalansági összefüggés” elnevezés, amelyet a Károlyházy eredményére hivatkozó cikkek megszokott természetességgel használnak. A bizonytalansági összefüggés megfogalmazása annyira kézenfekvő és követhető, hogy érdemes itt felidézni:

Időmérő szerkezetben legyen az óramutató tömege M , mozogjon v sebességgel, helybizonytalansága legyen Δx . A Heisenberg-reláció szerint: $\Delta x \Delta p \geq \hbar$. Az inerciarendszer téridő-koordinátái közül az időtengelyen tűzzünk ki egy $s = cT$ ívszakaszt, keressük annak Δs bizonytalanságát: $\Delta s = c\Delta T$. Ha az óra járása egyenletes, akkor

$$\Delta x = v \Delta T = \frac{v}{c} \Delta s.$$

Ebből

$$\Delta s = \frac{c}{v} \Delta x,$$

és az ívhossznak ez – a helybizonytalanságnál lényegesen nagyobb – bizonytalansága adja meg az óramu-

tató legnagyobb lineáris l méretét is, hiszen a $\Delta s = c\Delta T$ méretnél távolabbi, a bizonytalansági időtartam alatt fénysebességgel sem elérhető tömegek már nem számíthatnak a mutatóhoz.

A mutató energiájának bizonytalansága:

$$\Delta E_m = \Delta \left(\frac{m v^2}{2} \right) = v(m \Delta v) = v \Delta p.$$

Ebből a tömeg bizonytalansága:

$$\Delta M = \frac{\Delta E_m}{c^2} = \frac{v \Delta p}{c^2} \approx \frac{\hbar \Delta x}{c^2} \approx \frac{\hbar}{c \Delta s}.$$

Az óramutató tömege az általános relativitáselmélet szerint meggörbíti a téridőt. A Schwarzschild-megoldás:

$$ds'^2 = c^2 dT'^2 \approx \left(1 - \frac{2GM}{rc^2} \right) c^2 dT^2$$

szerint a tömeg jelenléte nélkül elképzelt $s = cT$ ívhossz

$$s' = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} cT \approx \left(1 - \frac{GM}{rc^2} \right) s$$

torzulást szenved az M tömegű óramutatóhoz közeli $r \approx l \approx \Delta s$ távolságra. A tömeg bizonytalansága s' -ben $\Delta s'$ bizonytalanságot okoz:

$$\Delta s' \approx \frac{GM}{c^2 \Delta s} s = \frac{G \hbar}{c^3 \Delta s^2} s.$$

Eszerint Δs növekedése csökkenti, csökkenése növeli $\Delta s'$ -t, ezért az ívhossz bizonytalansága akkor lesz minimális, ha $\Delta s' \approx \Delta s$. Ekkor

$$\Delta s^3 \approx \frac{G \hbar}{c^3} s = (\Lambda_p)^2 s,$$

vagyis az ívelem bizonytalansága:

$$\Delta s \approx (\Lambda_p)^{2/3} s^{1/3},$$

ahol a Planck-hossz

$$\Lambda_p = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^3}} = 1,69 \cdot 10^{-33} \text{ cm.}$$

Az időtengelyen mért ívhosszból:

$$\Delta T = \frac{\Delta s}{c} \approx T_p^{2/3} T^{1/3},$$

ahol a Planck-idő:

$$T_p = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^5}} = 5,3 \cdot 10^{-44} \text{ s.}$$

A köznapi gyakorlatban megszokott 1 másodperc időtartam bizonytalansága: $\Delta T \approx 10^{-29}$ másodperc, ennél pontosabban elvileg nem lehet meghatározni – és így megmérni sem – a másodpercet. Az ívelem relatív bizonytalansága:

$$\frac{\Delta s}{s} \approx \left(\frac{\Lambda_p}{s} \right)^{2/3},$$

az időmérés relatív bizonytalansága

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \left(\frac{T_p}{T} \right)^{2/3}.$$

Mivel a relatív bizonytalanság az ívhossz vagy az időtartam kétharmadik hatványával fordítva arányos, érdekes következmény, hogy a téridőben minél nagyobb távolságot vagy időtartamot kívánunk megmérni, annál kisebb lesz a mérés kvantummechanikai és gravitációs eredetű relatív bizonytalansága. Példaként a Planck-idő relatív bizonytalansága a képlet szerint egységnyi, a Planck-időnél 44 nagyságrendnyivel nagyobb másodperc relatív bizonytalansága viszont 10^{-29} nagyságrendű. Érdemes megjegyezni, hogy a végső képletekben csak természeti állandók szerepelnek, a példában feltételezett óramutató tömege és sebessége kiestek, tehát ez a bizonytalanság magának a téridőnek a sajátja.

Károlyházy másik lényegi mondanivalója annak előre jelzése, hogy a testek kvantummechanikai állapota szükségszerűen spontán redukciót szenved a tudatos emberi beavatkozást feltételező mérési folyamattól függetlenül. A téridő fentebb leírt bizonytalansága miatt egy részecske, vagy akár makroszkopikus méretű test kvantummechanikai állapotát leíró, a Schrödinger-egyenlet szerint térben szétterjedő hullámfüggvény relatív fázisaiban bizonytalanságok keletkeznek, a hullám koherenciája sérül. Amikor ez a bizonytalanság eléri a π értéket, vagyis beáll a relatív fázisok teljes határozatlansága, akkor a kvantummechanikai állapot egymáshoz képest inkoherens komponenseket tartalmaz. Ezt az inkoherenciát Károlyházy 1966-ban leírt javaslata szerint úgy lehet feloldani, hogy a vizsgált test állapotfüggvénye spontán módon, véletlenszerűen az egyik olyan komponensre redukálódik, amelyben a koherencia még nem veszett el. Ez a javaslat ellentétben áll a méréselmélet korábbi fogalmaival, nem igényli a mérést tudatosan tervező kísérletező ember beavatkozását.

A spontán redukció (*SR*) paraméterei mikrorészecskékre és makroszkopikus testekre lényegesen eltérnek egymástól [3, 4]: míg az elemi részecskék spontán redukciójának bekövetkezéséhez nem elegendő az Univerzum ismert térbeli mérete és időbeli élettartama, addig egy 1 grammos golyó tömegközépponti hullámfüggvénye mozgás közben másodpercenként százezerszer szenved redukciót 10^{-18} méternyi térbeli lokalizációval követve a makroszkopikus fogalmak szerinti pályáját. E kétféle mozgásforma között a tömeg függvényében lényegében folytonos az átmenet.

A hullámfüggvény tudatos méréstől független redukciójának lehetőségét több mint két évtizeddel Károlyházy után Roger Penrose [5], Diósi Lajos [6] és egy trieszti csoport [7] vetette fel. Roger Penrose 1989-ben született, magyarul legutóbb kiadott könyvében [5] pendítette meg a hullámfüggvény objektív redukciójának (*OR*) lehetőségét az időben meg nem fordítható kvantummechanikai jelenségek magyarázatára. A hullámfüggvény unitér (*U*) fejlődését leíró Schrödinger-egyenlet időszimmetrikus, a jövőből a múltba tartó időfüggvény ugyanúgy nyomon követhető, mint a múltból a jövő felé tartó időfüggvény. A mérés a hullámfüggvény szerint fejlődő szuperponált állapotok közötti választással, az állapot redukciójával jár, és a redukció (*R*) nem időszimmetrikus: a múltból visszafelé kvantummechanikai jellegű számítási módszer nem létezik, ilyen visszafelé jóslás nem működik. Konkrét idő-aszimmetrikus jelenség példaként írja le Penrose egy félig áteresztő tükörre bocsátott foton esetét. Ha a foton kibocsátó lámpa felvillan, a tükör mögött lévő detektor megszólalásának a valószínűsége 1/2, ha viszont a detektor megszólal, akkor biztosan felvillant a lámpa, nem 1/2, hanem 1 valószínűséggel.

Könyvében a méréstől, vagyis az emberi tudat által vezérelt megfigyeléstől független objektív redukciót az úgynevezett egy graviton szinthez kapcsolódó gravitációs téridő-göbülettel magyarázta. A graviton szint mértéke hozzávetőleg a Planck-tömeg századrésze: $\sim 10^{-7}$ g (körülbelül 0,05 mm élű kocka víztartalmának tömege). Diósi részletesen kidolgozott, ugyancsak a gravitációs hatásra alapozott munkáját párhuzamba állítva Penrose egy legutóbbi cikkében [8] az objektív redukció (*OR*) Diósi–Penrose-modelljéről értekezik.

Penrose az említett könyvében veti fel azt az ötletet, hogy a tudatosság lehetséges kvantumelméletének alapvető eleme éppen az objektív redukció lehet. További munkáinak többsége ezzel, a tudatosság fizikai elméletének problémájával foglalkozik. Ez a téma-kör megérdemelne egy különálló ismertető cikket.

Végül érdemes áttekinteni a kapcsolatot és a különbséget a spontán redukció Károlyházytól és származó, 1966-ban született elmélete és az objektív redukció Penrose-tól származó, 1989-ben közölt elmélete között.

– A spontán redukciót (*SR*) a terjedő hullámfüggvény fázisainak inkoherenciája okozza, amely a téridőnek a newtoni gravitációs állandót is tartalmazó képlettel kifejezett saját belső bizonytalanságából ered. A spontán redukció bekövetkezését meghatározó mennyiségek a test méretével, tömegével folytonosan változnak.

– Az objektív redukciót (*OR*) is a gravitáció és a téridő kölcsönhatása okozza, a tömeggel rendelkező test hullámfüggvényében szétterjedő szuperponált részeinek gravitációs egymásra hatásából ered, és bekövetkezése küszöbértéket feltételez a gravitáció hatására létrejött téridő-göbület mértékében.

Károlyházy Frigyes 1966-ban elsőként mutatta ki, hogy az atomi és szubatomi részecskék köznapi józan ész számára szokatlan kvantummechanikai leírása a makroszkopikus testek viselkedésére is alkalmazható.

Ha a test hullámfüggvényének a gravitáció által kiváltott spontán redukciót is figyelembe vesszük, akkor a méret és a tömeg függvényében folytonos átmenettel jutunk a kvantummechanikai és gravitációs hatás által kissé megzavart, klasszikus fizikai leírás szerinti mozgásformához. Károlyházy időbeli elsőbbsége, prioritása nyilvánvaló a kvantummechanikai állapotfüggvény méréstől, emberi tudattól független spontán redukciójának témakörében. Élete végéig folytatott kutató munkáját és gondolatait az utóbbi évtizedekben már csak szóbeli előadások során tárta villanásszerűen a hazai tudományos közvélemény egyre szűkebb, alkalmi érdeklődő körei elé.

Irodalom

1. F. Károlyházy: Gravitation and quantum mechanics of macroscopic objects. *Il Nuovo Cimento*, XLII A/2 (1966) 390–402.

2. Károlyházy Frigyes: Gravitáció és a makroszkopikus testek kvantummechanikája. *Magyar Fizikai Folyóirat* 12 (1974) 24–85.
3. F. Karolyhazy, A. Frenkel, B. Lukacs: *On the possible role of gravity on the reduction of the wave function in Quantum Concepts in Space and Time.* (szerk.: R. Penrose, C. J. Isham) Oxford Univ. Press, 1986.
4. Frenkel Andor: A kvantummechanika Károlyházy modellje. *Fizikai Szemle* 62/9 (2012) 310–313.
5. Roger Penrose: *A császár új elméje.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011.
6. L. Diósi: Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations. *Phys. Rev. A* 40 (1989) 1165–1174.
7. G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber: Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Phys. Rev. D* 34 (1986) 470–491; G. C. Ghirardi, R. Grassi, A. Rimini: Continuous-spontaneous reduction model involving gravity. *Phys. Rev. A* 42 (1989) 1057–1064.
8. R. Penrose, S. Hameroff: Consciousness in the Universe: Neuroscience, Quantum Space-Time Geometry and Orch OR Theory. *Journal of Cosmology* 14 (211) in press.

EXOBOLYGÓK A FIZIKA ÉRETTSÉGIN – I. RÉSZ

Horváth Zsuzsa

Kosztolányi Dezső Gimnázium, Budapest

Érdi Bálint

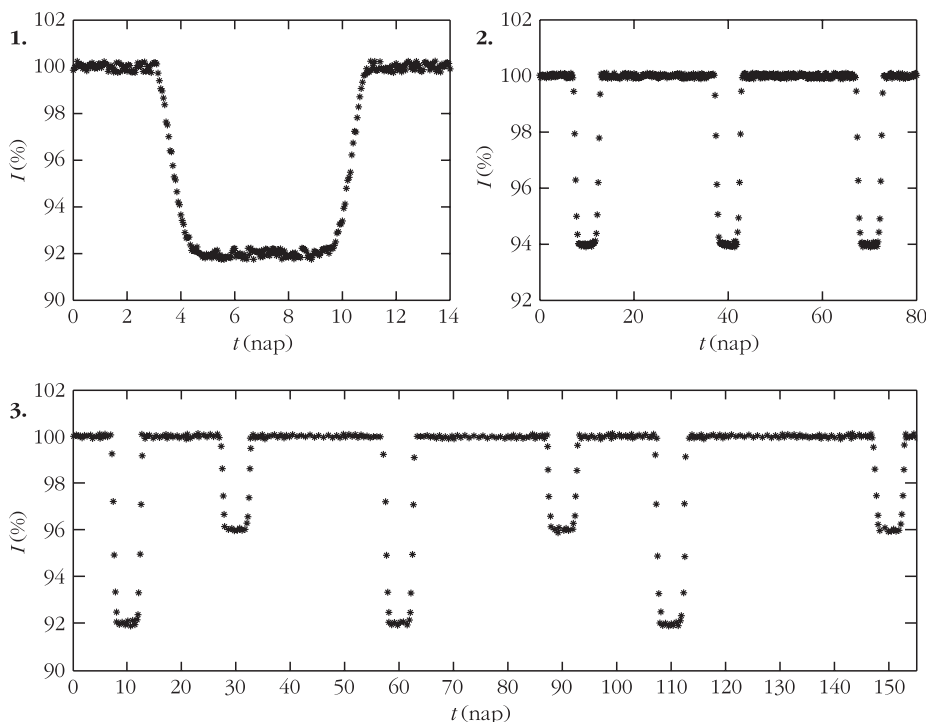
Éotvös Loránd Tudományegyetem, Csillagászati Tanszék

A 2011. májusi fizika középszintű érettségi egyik választható feladata a Naprendszeren kívüli bolygókkal, exobolygókkal volt kapcsolatos. Tankönyveinkben még nem szerepelnek ezekkel foglalkozó ismeretek, hiszen az első ilyen égitest felfedezése óta 20 év sem telt el. Az exobolygó-kutatás napjaink sikeres, gyorsan fejlődő csillagászati területe. A jelenkori kutatások bemutatása tanulóinknak igen nehéz, ez alól az egyik kivétel az exobolygó-kutatás, hiszen eredményei könnyen közérthetővé tehetőek, és mindenkit érdekelnek, ezért a hozzá kapcsolódó fizikai ismereteket is jobban megjegyzik diákjaink. Az érettségi feladathoz kapcsolódóan mutatjuk be az exobolygókat, a fontosabb megfigyelési módszereket, néhány kutatócsoportot és az űrtávcsöveket. Egy-két érdekesebb exobolygórendszer is megemlítünk.

Emlékeztetőül a 2011. májusi középszintű 3/A feladat szövege és ábrái [1]:

Az exobolygók (azaz a mi Naprendszerünkön kívüli bolygók) egy része olyan pályán kering a csillaga körül, hogy a Földről nézve áthalad

a csillag előtt. Ilyen exobolygókat, különösen a nagyobbakat, fel lehet fedezni úgy, hogy a csillag fényességét folyamatosan mérve észleljük, amikor a bolygó áthalad előtte, ugyanis ilyenkor a bolygó részleges takarása miatt a mért fényesség lecsökken. Az első grafikon mutat egy tipikus mérési görbét, ahol a csillagfény intenzitásának százalékos csökkenése van feltüntetve.



a) Körülbelül mennyi idő alatt haladt át a bolygó a csillag előtt?

b) Mit mondhatunk a görbe alapján a csillag és a körülötte keringő bolygó átmérőjének viszonyáról (arányáról)?

c) A második ábra egy másik csillag fényintenzitásának az előzőnél hosszabb időn át mért változását tartalmazza. A csillag felületének mekkora hányadát takarja ki a bolygó? Mekkora a keringés periódusideje és nagyságrendileg mennyi idő alatt halad át a csillag előtt a bolygó?

d) A harmadik grafikon egy harmadik csillag fényintenzitásának mérési eredményét mutatja. Olvassa le a grafikonról a fényintenzitás csökkenések közelítő időpontjait! Mi lehet a magyarázata annak, hogy a fényintenzitás-minimumok eltérő mértékűek? Hogyan értelmezhető az egymást követő fényintenzitás-minimumok között eltelt időintervallumok eltérő nagysága?



A javítási-értékelési útmutató ide vonatkozó része:

a) *A bolygó áthaladási idejének leolvasása a görbéről:* (2 pont) A bolygó körülbelül 8 nap alatt halad át a csillag előtt (a csillag fényességcsökkenésének kezdetétől a teljes fényesség újbóli eléréséig számítva). (Nem kell hibának tekinteni, ha a vizsgáló csak a körülbelül 6 napig tartó minimális fényességű időszak tartamát olvassa le, így a 6 nap is teljes pontszámot ér. Ez a megjegyzés a továbbiakban is érvényes.)

b) *A takarás mértékének megállapítása:* (2 pont). A csillag felületének 8%-át takarja ki a bolygó.

A csillag, illetve a bolygó sugara közti viszony kiszámítása: (4 pont, bontható). A bolygó és a csillag látszólagos felületének viszonya $0,08$. $(r^2\pi)/(R^2\pi) = 0,08$ (2 pont), amiből $2r/2R \approx 0,28$ arány adódik (2 pont).

c) *Az adatok helyes leolvasása:* (4 pont, bontható). A bolygó a csillag látszólagos felületének körülbelül 6%-át takarja ki (1 pont). A bolygó 30 napos periódusidejével kering a csillag körül (2 pont). A bolygó áthaladási ideje körülbelül 2-8 nap (1 pont). (Mivel a grafikonról az áthaladás ideje csak rosszul látható, a becslést tág határok között kell elfogadni.)

d) *A közelítő időpontok helyes leolvasása:* (2 pont, bontható). (2 pont akkor adható, ha mind a hat adatot helyesen olvasta le a vizsgáló. 1 pontot egynél nem több félreolvasás esetén lehet adni.)

Az eltérő mértékű fényintenzitás-csökkenés magyarázata: (3 pont, bontható). A csillag körül két, különböző átmérőjű bolygó kering. (A két bolygó felismerése 2 pont, a különböző átmérőre utalás 1 pont. Egyéb értelmes ötletekre, magyarázatokra 1 pont adható.)

Az egymást követő fényintenzitás-csökkenések között eltelt időintervallumok eltérő voltának magyarázata: (3 pont, bontható). Hol az egyik, hol a másik bolygó takarja a csillagot. A két exobolygó keringési periódusa különböző. (A két bolygó váltakozó lefedésére való utalás 1 pont, a különböző periódusidő kimondása 2 pont.)

Összesen 20 pont.

A feladatból megtudhatjuk, hogy mik is az exobolygók, és az egyik megfigyelési módszerüket (az átvonulási fotometriát) is leírják, majd a fénygörbéről kell információkat leolvasni. Az utolsó kérdésnél már egy kissé bonyolultabb fénygörbét találunk, amelynek okára (két különböző átmérőjű bolygó is kering a csillag körül) is rákérdeznek [1].

Az érettségi feladat képen a WASP-12b exobolygó művészi ábrázolására ismerhetünk. A név első része a SuperWASP (Wide Angle Search for Planets, Nagy Látószögű Keresés Bolygók után) angol kutatócsoportra utal, amely 2008-ban fedezte fel ezt a planétát, a WASP-12-nek elnevezett csillag körül. A 12-es szám arra utal, hogy a SuperWASP kutatócsoportnak ez volt a 12. felfedezett exobolygója.

Az első, fősorozatbeli csillag körüli exobolygó felfedezése 1995 augusztusában történt. *Michael Mayor* és *Didier Queloz*, a Genfi Observatórium munkatársai az 51Peg, egy tőlünk 50 fényévnnyire levő, Napunkhoz hasonló csillag körül találtak egy fél Jupiter tömegű exobolygót [2]. A Bellerophonnak elkeresztelt égitest mindössze 4 nap alatt kerüli meg csillagát. Alig fél év múlva, 1996 elején *Geoffrey Marcy* és *R. Paul Butler* talált a hozzánk képest 80 fényévnnyire levő 70Vir csillag körül egy több, mint 6 Jupiter tömegű exobolygót.

Ezután egyre szaporodtak a felfedezések. Eleinte igen nagy, csillagukhoz közel keringő gázóriásokat, „forró Jupitereket”, fedeztek fel. Ez igen meglepő volt, és felvetődött a bolygók pontosabb meghatározásának a kérdése is.

Hol a határ egy csillag és egy bolygó tömege között? Az elmúlt tíz évben a Nemzetközi Csillagászati Unió két konferencián is foglalkozott a bolygók meghatározásával. 2003-ban a felső tömeghatárt határozták meg, 13 Jupiter-tömegben. Az ennél nagyobb tömegű égitestekben beindulhatnak a fúziós folyamatok (először a deutériumé), így ezeket már nem (exo)bolygóknak, hanem barna törpéknek nevezik. Nemcsak a Naprendszeren kívül fedeznek fel újabb égitesteket, hanem a Naprendszeren belül is, amelyek már nem nagy tömegűek. Így felvetődött a bolygók alsó tömeghatárának a kérdése is. A 2006-os prágai konferencián vitatták meg ezt a kérdést, pontosan meghatározták, mit nevezünk bolygónak. Eszerint bolygó az az égitest, amely a Nap körül kering, és elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy kialakuljon a hidrosztatikai

egyensúlyt tükröző közel gömb alakja, valamint tisztára söpri a pályáját övező térséget. Itt nem olyan könnyű tömeghatárt megadni, mert a tömegén kívül a csillagtól való távolságtól is függ, hogy egy égitestet bolygónak tartunk-e; gravitációsan uralja-e pályája környékét. A Plútó már nem tartozik a bolygók közé, tömege kevesebb, mint a Föld tömegének ezredrésze. A Plútó és hozzá hasonló naprendszerbeli égitestek részére a törpebolygó elnevezést javasolták. Már a 2003-as konferencián szó volt az exobolygók definiálásáról, amely szerint exobolygók azok az égitestek, amelyek csillagok vagy csillagmaradványok körül keringenek, és tömegük alatta van annak a határértéknek, aminél a deutérium termonukleáris fúziója beindulna (13 Jupiter tömeg). Egyelőre az alsó tömeghatárral kapcsolatban még nincs probléma, mert a Földhöz hasonló tömegű exobolygó felfedezésekből nincs sok [3].

A Világegyetemben százmilliárdnyi galaxis figyelhető meg, és mindegyikben, mint a mi Tejútrendszerünkben is, néhány százmilliárdnyi csillag található. A csillagok jelentős részének lehetnek bolygó kísérői, így csak a mi galaxisunkban több milliárd bolygó várhat a felfedezésre. A halványabb vagy messzi csillagok megtalálása is igen nehéz, a körülöttük levő bolygók észlelése pedig reménytelennek tűnhet. A mai távcsövek és egyéb megfigyelési eszközök (például spektroszkópok) igen pontos méréseket, észleléseket tesznek lehetővé, a digitális fényképezés pedig megkönnyítette a jó minőségű felvételek készítését. A számítástechnika ugrásszerű fejlődése az adatok (képek) tárolását és feldolgozását könnyítette meg nagymértékben, így vált lehetővé az exobolygók megtalálása, kutatása.

A legeredményesebb exobolygó-keresési módszerek

Radiális sebesség-mérés

Eleinte a csillagok látóirányú sebességmérésének segítségével fedeztek fel exobolygókat. Ha egy csillagnak van egy számottevő tömegű kísérője, amely lehet csillag vagy bolygó is, akkor a két égitest a közös tömegközéppont körül kering. Abban az esetben, ha a csillag pályasíkja nem a látóirányunkra merőleges, mozgása során egyszer közeledik, másszor távolodik tőlünk, vagyis látóirányú (radiális) sebessége változik. Ez a sebesség-ingadozás a csillag spektrumában levő vonalak kék eltolódását (felénk való közeledéskor) és vörös eltolódását (tőlünk való távolodéskor) okozza (Doppler-effektus). A hullámhossz-eltolódás méréseiből a radiális sebesség meghatározható:

$$v_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda},$$

ahol c a fénysebesség és λ a vizsgált színekpvonal hullámhossza. A színekpvonalak eltolódásának periódusa az exobolygó keringési idejét adja meg. Minél nagyobb tömegű a kísérő égitest és minél közelebb

kering csillagához, annál nagyobb mértékű a csillag látóirányú sebességének ingadozása. Természetesen ez az érték a pályahajlás mértékétől is függ. Ha a pályasík szöget zár be a látóirányunkkal, akkor csak a sebesség látóirányunkba eső komponensét tudjuk mérni, ezért a kísérő égitest tömegére csak alsó becslés adható ezzel a módszerrel. Abban az esetben, ha az exobolygó éppen a látóirányunkra merőlegesen kering, ilyen módon nem detektálható [4, 5].

Asztrometria

Az asztrometriai módszernél is azt használják ki, hogy az exobolygó gravitációs hatása ide-oda rángatja a csillagot a közös tömegközéppont körül, így a látó mozgás egyenletlenségéből a láthatatlan kísérő tömegére és helyzetére lehet következtetni. Különbség az előző módszerhez képest, hogy ennél nem a látóirányú, hanem az erre merőleges, az égboltra vetülő komponenszt mérik, a legnagyobb távcsövekkel. Először ezzel a módszerrel próbáltak exobolygót keresni a Barnard csillag körül a múlt században. *Peter van de Kamp* több évtizedig figyelte ezt a tőlünk mindössze 6 fényévre levő csillagot, mivel a Földről nézve sajátmozgása ennek a legnagyobb (a Naptól eltekintve). Az észlelt hullámzó mozgást a csillag körül keringő bolygónak tulajdonították, ami tévesnek bizonyult. Nemcsak a mérési pontosság hiányzott, hanem a planéta is. 2009-ben fedeztek fel ezzel a módszerrel exobolygót (VB10b), amelynek érdekessége, hogy méretében hasonló csillagához, de természetesen jóval könnyebb nála [4].

Átvonulási fotometriai

A radiális sebesség-mérésen kívül fotometriai módszerrel figyelik meg a legtöbb exobolygót, és mivel a Kepler-űrszonda ilyen elven keresi a csillagok bolygókísérőit, egyre több tranzitos exobolygó felfedezése várható. Tranzitmódszerként is szokták emlegetni ezt a módszert, mert a központi csillag fényességcsökkenését vizsgálják, miközben egy bolygója elvonul a csillag előtt. A Naprendszerben is jól megfigyelhetők fedési jelenségek, amikor keringése során egyik égitest a másik elé, majd mögé kerül. Gondolhatunk a nap- és holdfogyatkozásokra, vagy a belső bolygók napkorona előtti áthaladásaira, és a Jupiter korongja előtt is megfigyelhetők a nagyobb holdjai. A fedési változó csillagok esetében már találtak a csillagászok az időleges fényességcsökkenés jelenségével. Ha egy kísérő csillag áthalad a másik csillag korongja előtt, akkor annak egyébként állandó fénye rövid időre csökken. A fénygörbe alakjából, a fényességcsökkenések időpontjából, időtartamából a láthatatlan kísérő méretét, pályáját határozhatjuk meg. A csillagok összetételére is következtethetünk a rendszer színekéből, ugyanis a halvány csillag el is tűnik a fényesebb mögött (mellékminimum), ekkor csak a fényesebb csillagot jellemzi a megfigyelt színek, majd az újbóli megjelenésénél, láthatóságánál a halványabb kísérő fénye is eljut hozzánk. Az exobolygók tranzitja csak mértékben különbözik a kettős-

csillagoknál megfigyeltektől, jóval kisebb az általuk okozott fényességcsökkenés. Összehasonlításképpen, ha egy messzi csillagról figyelnénk a Jupiter Nap előtti átvonulását, az 1%-nyi fényességcsökkenést okozna, míg a Föld fedése csak 0,01%-nyit. A fénygörbe mélysége a bolygó és csillaga méretarányától függ, ezért földszerű bolygók keresése a kisebb vörös törpecsillagok körül a legeredményesebb. Minél messzebb van egy bolygó a csillagjától, annál kisebb a valószínűsége, hogy észleljük átvonulását a csillag előtt, esetleg némelyik csak sűrölja a csillagkorongot (ez még kisebb fényességcsökkenéssel jár). Figyelembe kell vennünk, hogy a csillag korongja sem egyenletes fényű, akár foltok is lehetnek rajta (hasonlóan a napfoltokhoz). A fotometriai eljárás segítségével az exobolygó-léggörök is elemezhetők. A bolygó csillaga előtti áthaladásakor a csillag fénye átvilágít a bolygó esetleges léggörén, és ez nyomot hagy a csillag színképében. A fénygörbe kis ingadozásából újabb exobolygókra vagy esetleg exoholdak létezésére is következtethetünk.

Hasonlóan a radiális sebesség méréséhez, itt is fontos, hogy a bolygó pályasíkja a látóirányunkkal egybeessen (vagy legfeljebb kissé térjen el tőle). Hosszabb keringési idejű bolygóknál türelmesen meg kell várni az újabb átvonulások idejét. Legalább három fedést kell megfigyelni ahhoz, hogy egy bolygójelöltből elismert exobolygó legyen, ami több évig is eltart. Általában még spektroszkópiai vizsgálattal is megerősítik az exobolygó létét, tulajdonságait. Hatékonyá tehető a fotometriai eljárással való bolygókeresés, ha egyszerre nagyon sok csillag fényességváltozását figyelik folyamatosan, hosszabb ideig (évekig). Más módszerrel felfedezett exobolygóknál is érdemes fénygörbét megfigyelni (ha lehetséges), mert így újabb adatokat ismerhetünk meg róluk. Például a radiális sebesség méréséből tömeget, a fotometriából méretet lehet meghatározni, így már az égitest sűrűségét is megismerhetjük [4–6].

Gravitációs mikrolencse hatás

Az általános relativitáselmélet szerint a nagy tömegek mellett elhaladó fény sugar elhajlik, vagyis egy közelebbi égitest (általában csillag) gyűjtőlencseként működik egy mögötte levő fényforrás (galaxis, csillag) számára. Azokban az esetekben, amikor egy közelebbi csillag nagy sajátmozgása következtében éppen egy távolabbi, látszólag fix helyzetű csillag előtt halad át (vagyis tőlünk nézve éppen elfedi a távolabbi csillagot), akkor e lencsehatás következtében a nagyító-lencseként működő csillag időszakosan felerősíti a háttércsillag fényét. Ez a jelenség távcsővel és a fény erősségét mérő eszközzel (fotométerrel) megfigyelhető. Kisebb mértékben ugyan, de egy a közelebbi csillag körül keringő exobolygó is képes lencseként működni, vagyis időszakos fényerősödést létrehozni, amely a fénygörbén másodlagos maximumként jelentkezik vagy a felszálló vagy a leszálló ágon. Tehát ha egy ilyen másodlagos púpot találunk, akkor az jelzi egy exobolygó létét a közelebbi csillag

körül. A másodlagos púp amplitúdója az exobolygó tömegétől függ, míg helyzete a fénygörbén megmutatja az exobolygó pillanatnyi szögtávolságát a csillagjától (ha ismerjük a csillag tőlünk mért távolságát, akkor ebből a csillag és a bolygó valódi távolsága is meghatározható). Ez a módszer különösen alkalmas a csillaguktól nagy távolságra levő exobolygók felfedezésére. Eddig így 16 bolygót figyeltek meg [7]. Probléma, hogy a jelenség ritka, előre nem jelezhető, és nem is ismétlődik, vagyis utólagosan nem igazolható. A kutatók célszerűen az égbolt olyan területére koncentrálnak, ahol a csillagsűrűség nagy (például a Tejútrendszer középpontjának környéke), és igyekeznek sok millió csillag fényváltozásait egyidejűleg követni annak érdekében, hogy a felfedezés valószínűsége nagyobb legyen. Ezzel a módszerrel van remény a csillagközi térben egyedül repülő „bolygók” felfedezésére is [4].

Direkt képalkotás

Legegyszerűbbnek tűnő eljárás, hogy takarjuk le valahogyan a központi csillag képét, és közvetlenül figyeljük meg a közelében található exobolygókat. A módszer a központi csillagtól távoli, fényes bolygóknál lehet eredményes, mert a csillag fénye egyébként teljesen elnyomja a bolygóét. A csillag és bolygója fényessége között akár milliárdszoros eltérés is lehet, de infravörös-tartományban milliószorosra csökkenhet ez az arány, így a képalkotás főképp infravörös hullámhosszakon lehetséges. Eddig 31 exobolygót sikerült lefényképezni (például a HR 8799b, c, d rendszert: http://keckobservatory.org/gallery/detail/milky_way/26).

Pulzárjelek vizsgálata

A pulzárak gyorsan forgó, erős mágneses térrel rendelkező neutroncsillagok. A pulzárak irányából nagyon pontos periodicitással rádióimpulzusokat észlelünk. A PSRB1257+12 pulzárról például 0,00622 s-ként érkeznek rádióhullámok felénk. Amennyiben a pulzárnak van kísérője, akkor a közös tömegközéppont körüli mozgásból adódóan hol közeledik, hol távolodik tőlünk, amit az észlelt impulzusok közötti időtartamok periodikus változásaként észlelünk. A rádióimpulzusok frekvenciájának ezt a szabályos váltakozását is a Doppler-effektussal magyarázhatjuk. A pulzárról jövő rádiójelek vizsgálatából kis tömegű bolygókísérők kimutatása is lehetséges.

Az exobolygók meghatározása alapján a csillagma-radványok körül keringő objektumokat is az exobolygók közé soroljuk. Így az első, további vizsgálatokkal megerősített exobolygó felfedezése már 1991 végén megtörtént. Ugyanis *Alekszander Wolszczan* és *Dale Frail* többes bolygórendszert talált egy pulzár (PSRB1257+12) körül. Ez a felfedezés azért nem hozta lázba a világot, mert a pulzárak gyorsan forgó neutroncsillagok, amelyek körül még a földtömegű exobolygók sem tudunk elképzelni életet, legalábbis a miénkhez hasonlókat nem. Természetesen a csillagászok kívül az embereket főleg az érdekli, hogy az ép-

pen felfedezett égitesten van-e, lehet-e élet, és az értelmes élet-e. Ez azonban külön tudományág, az asztrobiológia foglalkozik ezekkel a kérdésekkel. Vannak más módszerek is, amelyekkel exobolygókat találhatunk, de az említettek a legjelentősebbek [4].

Irodalom

1. http://www.oh.gov.hu/3_1_6_korabbi_erttsegi/2011-majusi-erttsegi-kozepszint
2. Michel Mayor, Didier Queloz: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* 378 (1995) 355–359.
3. Csizmadia Szilárd: A Plútó osztályozásáról. *Fizikai Szemle* 56/12 (2006) 399–403.
4. Almár Iván: *Kozmikus társkereső*. Kossuth Kiadó, 2011.
5. Szatmáry Károly: Bolygók mindenütt. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 433.

6. Szabó Róbert: Bolygóáradat és asztroszeizmológia. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 121–126.
7. <http://exoplanet.eu/catalog/?f=%22microlensing%22+IN+detection>

További források

Kereszturi Ákos: *Asztrobiológia*. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2011.
Meteor Csillagászati évkönyv 2011, 2009, 2003
<http://tudasbazis.csillagaszat.hu>
<http://hirek.csillagaszat.hu>
<http://www.konkoly.hu/KIK>
<http://kepler.nasa.gov> – A Kepler-misszió honlapja
<http://exoplanet.eu>
<http://astro.elte.hu>
<http://www.spacechronology.com/exoplanets.html>
<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/kepler2b>

A FIZIKA TANÍTÁSA

KÁROLYHÁZY-FELADATOK AZ EÖTVÖS-VERSENYEN

IV. RÉSZ – ELEKTROMOS ÁRAM

A 60-as években főleg elektromosságtani feladatokkal jelentkezett *Károlyházy Frigyes* az Eötvös-versenyen – nyilván ezekben volt hiány, ilyeneket kért tőle *Vermes Miklós*. 1960-ban RC-, 61-ben, 67-ben és 68-ban RL-hálózatokban kellett vizsgálni ki- és bekapcsolási jelenségeket, és – amennyire lehet – leírni a fellépő áramlökéseket. Izgalmas kivételként bádoglemezből készített zárt hengerek elektromos ellenállását kellett összehasonlítani 1962-ben. Ez már jellegzetesen Károlyházy-feladat volt, Vermes el is készítette ezeket a hengereket, és elhelyezte őket nevezetes szertárában, a csepeli Jedlik Ányos Gimnáziumban.

A 70-es, majd a 80-as években kevesebb elektromos feladatot adott Károlyházy Frigyes, példaképpen idézzük fel közülük néhányat – az ábrák és a megoldás részletes bemutatása nélkül.

Közös, teljesen zárt vasmagon 200, 300 és 400 menetes tekercsek vannak. Hogyan kell ezeket összekapcsolni, hogy a keletkezett tekercsrendszer önindukciós együttműködése a lehető legkisebb legyen? (1975/3. feladat)

Ez a feladat arra az elméletileg izgalmas tényre világít rá, hogy a párhuzamosan kapcsolt ideális, szoros csatolású tekercsek eredő inductivitása zérus. Ugyanezt a kezdeti összeállítást használta fel Károlyházy Frigyes 1981-ben:

Egy transzformátornak 200, 300 és 400 menetes tekercsei vannak. Mely kapcsolásban lehet egy adott váltófeszültséget a lehető legnagyobb arányban erősíteni? (1981/3. feladat)

E feladatnak már nincs triviális megoldása; sok próbálgatás, gondolati kísérletezgetés után lehet rájönni, hogy ha a 200 és a 300 menetes tekercseket ellentétesen kapcsolva használjuk primer tekercsként, a 300 és 400 menetes tekercset pedig szabályosan sorba kapcsolva szekunderént, akkor 7-es erősítést érhetünk el, amely az adott esetben a lehetséges maximális érték.

Egy kartonhengertől meghatározott távolságra, vékony fonálra egy lágyvasdarabkát függesztünk. A hengerre huzalból tekercset csévélünk, és erre egy meghatározott váltófeszültséget kapcsolunk. A vasdarabka kissé elmozdul. Hogy a hatást megnöveljük, a hengerre kétszer annyi menetet csévélünk. Mit fogunk tapasztalni? (1987/3. feladat)

Azt kellett észrevenni, hogy a vasdarabkára kifejtett erőhatás a tekercsben folyó árammal és a tekercs menetszámával is közelítőleg arányos. A menetszám megkétszerezése négyszeresre növelné a tekercs inductivitását, majdnem ilyen arányban nőne a tekercs váltóáramú ellenállása is, tehát a tekercsen átfolyó áram majdnem a negyedére csökkenne. Hiába a menetszám kétszereződése, az áram sokkal jobban csökkenne, így az erőhatás is kisebb lenne.

1989-ben Vermes Miklós már nem vett részt a versenybizottságban. Ebben az évben mindhárom feladatot Károlyházy Frigyes adta. Idézzük fel most az elektromosságtani feladatot, megoldással együtt.

Az iskolai 12 V-os, 50 Hz-es váltóáramú áramforrásra sorba kapcsoltunk egy 24 V, 10 W-os izzót

és egy $101,3 \mu\text{F}$ kapacitású kondenzátort. Az izzó alig világít. Rendelkezésünkre áll még egy $0,1 \text{ H}$ induktivitású tekercs is. Hogyan lehetne a kapcsolást úgy átalakítani, hogy az izzó szép fényesen világítson? (A tekercs ohmos ellenállása elbanyagolható. Csak a kapcsolást szabad átalakítani, az alkatrészeket nem.)

Megoldás. A 24 V , 10 W -os izzó ellenállása:

$$R = \frac{(24 \text{ V})^2}{10 \text{ W}} = 57,6 \ \Omega.$$

A $101,3 \mu\text{F}$ -os kondenzátor váltóáramú ellenállása:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \text{ s}^{-1} \cdot 101,3 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 31,4 \ \Omega.$$

A $0,1 \text{ H}$ induktivitású tekercsre:

$$X_L = \omega L = 314 \text{ s}^{-1} \cdot 0,1 \text{ H} = 31,4 \ \Omega.$$

Mivel e két váltóáramú ellenállás egyenlő, az embernek azonnal a rezonancia jut az eszébe. Kapcsoljuk sorba mindhárom elemet! Ekkor az eredő impedancia az ohmos ellenállással egyenlő, és erre jut a generátor teljes feszültsége – mégsem ez a legjobb megoldás. Igaz, eredetileg a kondenzátorra és az ellenállásra együtt jutott 12 V , most pedig magára az ellenállásra egyedül, de hát hol van ez még attól a 24 V -tól, ami az izzó üzemi feszültsége? Jobban világít az izzó, de ez még nem az igazi.

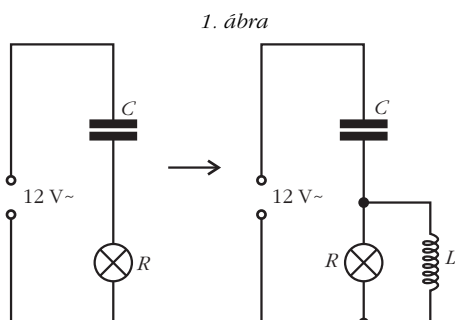
Ha mindhárom elemet párhuzamosan kapcsoljuk, akkor is csak 12 V juthat az izzóra.

Térjünk vissza az eredeti ötlethez, a soros rezonancia esetéhez! A sorba kapcsolt tekercsen és kondenzátoron külön-külön sokkal nagyobb lehet a feszültség, mint a generátor feszültsége. Nem lehetne ezt kihasználni?

Kössük sorosan a tekercset és a kondenzátort a generátorra, és kapcsoljuk az izzót valamelyik elemmel párhuzamosan! Mivel eredetileg a kondenzátor és az izzó voltak sorosan kapcsolva, a legegyszerűbb az lesz, ha a már összeállított kapcsolásban az izzóra párhuzamosan rákötjük a tekercset (1. ábra).

Most hogyan határozhatjuk meg az izzóra jutó feszültséget?

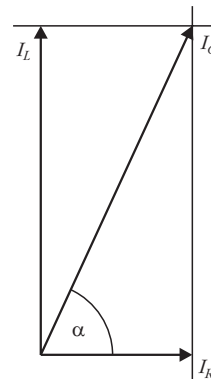
Az izzóra és a tekercsre ugyanaz a feszültség jut. A tekercsen átfolyó áram negyed periódust (90° -ot) késik



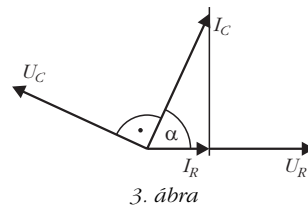
ehhez a feszültséghez képest, az izzón átfolyó áram pedig ugyanabban a fázisban van, mint a rá jutó feszültség. Ez azt jelenti, hogy a tekercsen és az izzó ellenállásán átfolyó áram között 90° fáziskülönbség van. A szokásos vektoros ábrázolással még a kondenzátoron átfolyó áramot is megkaphatjuk, mint a kettő vektori összegét (2. ábra).

Az ábra alapján $\text{tg} \alpha$ értéke:

$$\text{tg} \alpha = \frac{I_L}{I_R} = \frac{R}{\omega L} = R \omega C.$$

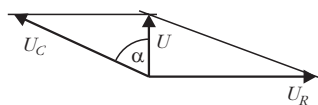


Az áramok vektorábráját felhasználva szerkeszthetjük meg a feszültségek vektorábráját. Az ellenálláson a feszültség ugyanolyan fázisú, mint a rajta folyó áram, tehát I_R és U_R vektora ugyanolyan irányú.



A kondenzátoron a feszültség 90° -kal van elmaradva a kondenzátoron folyó áramhoz képest, ahogy azt a 3. ábra mutatja. U_C értéke az ábra alapján

$$U_C = I_C \frac{1}{\omega C} = \frac{I_R}{\cos \alpha} \text{tg} \alpha = \frac{U_R}{\sin \alpha}.$$



Ezt az összefüggést felhasználva szerkeszthetjük meg a generátor feszültségének vektorát is (4. ábra).

A 4. ábráról már leolvasható az izzóra jutó U_R és a generátor U feszültsége közti összefüggés:

$$U_R = U \text{tg} \alpha = U \frac{R}{\omega L} = 12 \text{ V} \cdot \frac{57,6 \ \Omega}{31,4 \ \Omega} = 22,0 \text{ V}.$$

Ekkor már mondhatjuk, hogy a 24 V -os izzó fényesen világít.

Ugyanilyen jó megoldás az is, ha az izzót a kondenzátorral kötjük párhuzamosan és velük sorba a tekercset. Az összes többi esetben az izzóra ennél kisebb feszültség jut.

Megjegyzés. Akik ismerik e vektoros számítás mélyebb hátterét, az úgynevezett komplex formalizmust, azok algebrai úton is kiszámíthatják mindazt, amit a fenti geometriai megoldásból kaptunk. A komplex formalizmusban az áramokat és a feszültségeket olyan komplex számokkal jellemezzük, amelyek abszolút értéke adja az áramok és feszültségek csúcser-tékét, a valós tengellyel bezárt szög pedig a fázisszög. A komplex impedanciák:

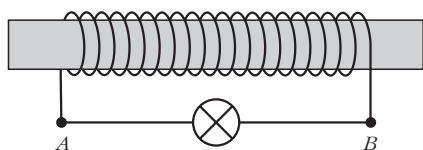
$$\tilde{X}_L = j \omega L, \quad \tilde{X}_C = \frac{1}{j \omega C}, \quad \tilde{R} = R,$$

ahol $j = \sqrt{-1}$ a komplex egységgyök.

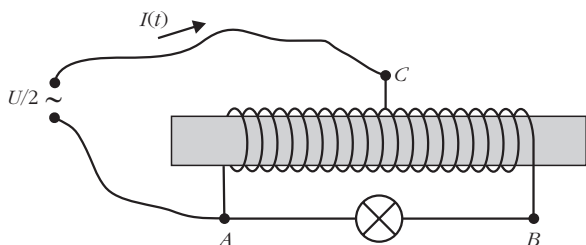
Hangsúlyozzuk azonban, hogy a feladatot meg lehetett oldani a komplex formalizmus ismerete nélkül is.

A hosszú tekercs és a kis izzó kedvenc kalandozási területe volt Károlyházy Frigyesnek, az indukció pedig maga egy olyan jelenség, amely különösen alkalmas fizikai gondolatok felcsillantására. Jól mutatja ezt az alábbi két Károlyházy feladat a 2007. és a 2009. évi Eötvös-versenyről.

Egy terebélyes vasmaggal ellátott, nagy önindukciójú, de mégis elbanyagolható ohmikus ellenállású tekercs végeit U feszültségre méretezett izzón keresztül kötjük össze. Ha az A és B pontok közé $U/2$ effektív értékű váltakozó feszültséget kapcsolunk, az izzó nagyon halványan világít.



5. ábra



Mivel a tekercs közepéről is van egy C kivezetés, megpróbáljuk a feszültségforrás pólusait az A és C pontokhoz kötni. Megváltozik-e az izzón átfolyó áram erőssége, és ha igen, hogyan? Az 5. ábrán bejelöltük a főágban folyó $I(t)$ pillanatnyi áram irányát. Hogyan folyik az áram ugyanekkor a tekercsben?

Megoldás. Három dolgot kell egymás után észrevennünk, hogy viszonylag gyorsan eljussunk a helyes válaszhoz.

1. Mivel a tekercs ohmikus ellenállása elhanyagolható, ezért $U_{AC} \approx U/2$ kell legyen, hogy ne folyjék a generátoron végtelen nagy áram.

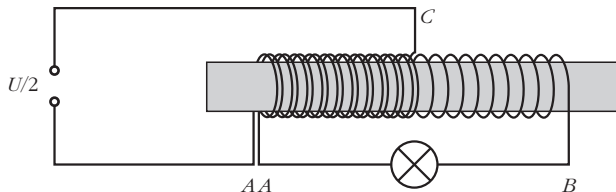
2. Mivel a fluxusváltozás mértéke a tekercs különböző részein ugyanakkora, ezért mindkét féltekercsen ugyanakkora az indukált feszültség, tehát $U_{AC} = U_{CB}$.

3. Mivel a lámpa párhuzamosan van kapcsolva a generátor plusz a tekercs jobb oldali felével, ezért

$$U_{\text{lámpa}} = U_{\text{gen}} + U_{CB} = \frac{U}{2} + \frac{U}{2}, \text{ tehát } U_{\text{lámpa}} = U.$$

Így a lámpa az „üzemi” feszültséget kapja, ezért jól ég!

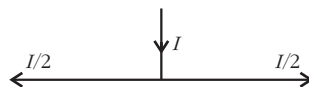
Az áramirányok meghatározásához – Werner Miklós ötlete alapján – rajzoljuk át a megadott kapcsolást a következő módon: képzeljük el, hogy a tekercs bal oldali részét alkotó huzalt hosszában kettévágjuk, és így ezen az oldalon két, egymás mellett futó tekercshez



6. ábra

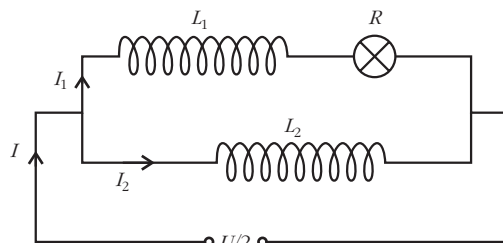
jutunk (6. ábra). Kaptunk egy AC tekercset, amire a generátor feszültségét kapcsoljuk, és egy AB tekercset, amire a lámpát kötöttük. Ez bizony egy transzformátor! A primer menetszám $N/2$, a primer áram (a feladatban alkalmazott jelölés szerint) I . A szekunder menetszám N , tehát a szekunder áram $I/2$ lesz.

C -től B felé $I/2$, C -től A felé ugyancsak $I/2$ ($I - I/2 = I/2$) áram folyik (7. ábra).



7. ábra

Megjegyzések. Bemutatunk további három megoldást, amellyel a versenyzők eljutottak a helyes válaszhoz. Mindegyikük „ráérezett” a feladatban rejlő transzformátorra (ténylegesen auto-transzformátornak nevezik a feladatban megadott kapcsolást), és helyesen alkalmazták az általuk ismert összefüggéseket. Nem részletezzük, csak vázoljuk a megoldásnál követett gondolatmeneteket.



8. ábra

1. *Konczer József* a 8. ábrán látható módon rajzolta át a kapcsolást. Figyelembe véve a tekercsrészek közötti szoros csatolást, a kölcsönös indukciós együttható: $M = (L_1 L_2)^{1/2}$. Az indukált feszültségek:

$$U_1 = -L_1 \frac{\Delta I_1}{\Delta t} + M \frac{\Delta I_2}{\Delta t},$$

illetve

$$U_2 = -L_2 \frac{\Delta I_2}{\Delta t} + M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}.$$

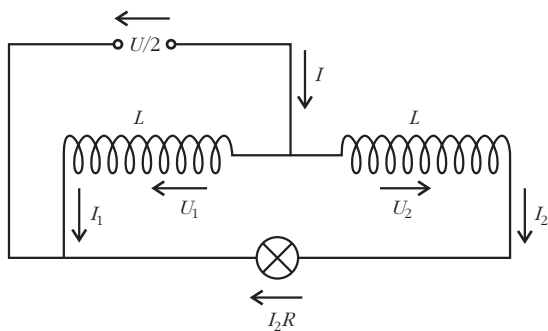
Mivel most $L_1 = L_2 = L = M$, ezért

$$U_1 + U_2 = 0.$$

A generátor feszültsége:

$$\frac{U}{2} = -U_2 = I_1 R - U_1,$$

ebből pedig $I_1 R = U$ következik.



9. ábra

2. Kónya Gábor a 9. ábrán látható módon rajzolta át a kapcsolást. A szinuszos váltakozó áram tárgyalására kidolgozott komplex formalizmus ismeretében ő az alábbi egyenleteket tudta felírni:

$$U_1 = j\omega L(I_1 - I_2),$$

$$U_2 = j\omega L(I_2 - I_1).$$

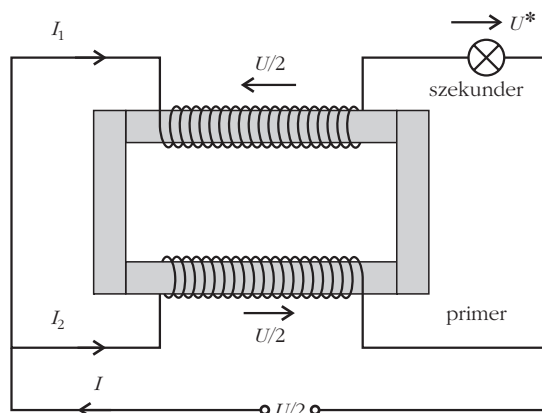
Ezekből következik, hogy $U_2 = -U_1$. Mivel

$$U_1 = U_2 + I_2 R \text{ és } U_1 = \frac{U}{2},$$

ezért

$$\frac{U}{2} = -\frac{U}{2} + I_2 R, \text{ vagyis } U = I_2 R$$

kell legyen. (j -vel itt is a komplex egységgyököt, $\sqrt{-1}$ -et jelöltük.)



10. ábra

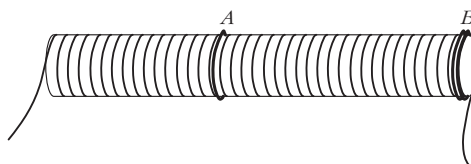
3. Szolnoki Lénárd úgy rajzolta át a kapcsolást (10. ábra), hogy még jobban emlékeztessen egy veszteségmentes, zárt vasmagú transzformátorra. Mivel a transzformátor szekunder oldalán ellentétes „irányú” a feszültség, mint a primer oldalon, ezért a felső hurok felírva a második Kirchhoff-törvényt, kapjuk:

$$\frac{U}{2} + \frac{U}{2} - U^* = 0, \text{ tehát } U^* = U.$$

Mindhárom megoldó már a saját rajzán helyesen jelölte be az áramok irányát.

Egy hosszú, keskeny szolenoidban egyenáramot tartunk fenn. Legyen például a tekercs hosszúsága $l = 60 \text{ cm}$, sugara $r = 2 \text{ cm}$, menetszáma $N = 600$, az áramerősség $I_0 = 1 \text{ mA}$.

A tekercset a közepe táján bízagmentesen körülvevünk egy egyszerű, zárt vezető hurokkal (A), és egy ugyanekkora átmérőjű, de kettős burkot (zárt, „kétmenetes tekercset”) (B) helyezünk el a tekercs szájánál is, a 11. ábra szerint. A és B olyan anyagból készült, amely viszonylag könnyen szupravezetővé tehető, ohmikus ellenállása kellőképpen alacsony hőmérsékleten zérussá válik.



11. ábra

Kezdetben természetesen nem folyik áram A-ban és B-ben. De most lehűtjük, szupravezetővé tesszük őket, majd a szolenoid áramkörét megszakítjuk. Ekkor (mivel a mágneses fluxus, amely egy zárt szupravezető áramkörön halad át, nem változhat meg) az A hurokban valamekkora I_A , a kettős hurokban I_B áram indukálódik, amely fenn is marad.

1. Hasonlítsa össze I_A és I_B nagyságát! Közelítőleg egyenlők-e, és ha nem, melyik nagyobb a másiknál és hányszor?

2. A szolenoidra vonatkozó adatok ismeretében adjon valamilyen ésszerű becslést I_A értékére!

Megoldás. Az első kérdésre viszonylag könnyen válaszolhatunk, ha felismerjük, hogy amikor állandó erősségű áram folyik a szolenoidban, akkor a tekercs szájánál fele akkora mágneses fluxus alakul ki, mint a tekercs közepe táján. (Ennek legegyszerűbb igazolásához úgy juthatunk, hogy gondolatban hozzáillesztünk a szolenoidhoz egy ugyanolyan másikat. Azon a helyen, ahol a két tekercs találkozik, mindkét tekercsnek a szimmetriatengely irányában $B/2$ nagyságú mágneses indukció-vektor komponens kell létrehozni ahhoz, hogy kialakuljon a tekercs belsejére jellemző, B nagyságú indukcióvektor.)

A fele nagyságú mágneses fluxust két menettel kell létrehozni a tekercs végén, vagyis egy menetben itt negyedakkora áram is elég, mint amire a tekercs közepe táján lévő egyetlen menetben van szükség.

A feladat második kérdése az A hurokban folyó I_A áram nagyságára vonatkozik. Egy körvezetőben folyó I áram a körvezető középpontjában

$$B = \mu_0 \frac{I}{2r}$$

nagyságú mágneses teret hoz létre. Első közelítésben tegyük fel, hogy ez éppen akkora, mint amekkorát a szolenoidban folyó I_0 áram hozott létre:

$$B = \mu_0 \frac{I_0 N}{l}.$$

Ebben a közelítésben tehát

$$I = 2r \frac{I_0 N}{l}$$

Behelyettesítve a megadott értékeket, a tekercs közepe táján levő hurokban indukálódó áramra $I = I_A = 40$ mA adódik. Figyelembe véve azonban azt, hogy a körvezető közepén a legkisebb a mágneses indukció értéke, vagyis a körlap pontjaira vonatkozó „átlagos” indukció ennél biztosan nagyobb, a 40 mA-nél biztosan kisebb áram indukálódik a szupravezető hurokban.

Felhasználva például a körvezető induktivitására a szakirodalomban található

$$L = \mu_0 r \ln \frac{r}{r_{drót}}$$

közelítő képletet (és feltételezve, hogy mondjuk $r_{drót} = r/50$), a körvezetőben indukálódó áramra a fluxus változatlanóságát kifejező

$$\mu_0 \frac{I_0 N}{l} r^2 \pi = L I_A$$

összefüggésből $I_A = 16$ mA adódik.

Megjegyzések:

1. A drót vastagságára vonatkozó adat nem szerepelt a feladat szövegében, de az eredmény – ésszerű határok között – nem is függ lényegesen ettől az adattól. Ha például a drót sugara $r/10$ vagy $r/100$, az indukálódó áramerősségre 27 mA, illetve 13 mA értékeket kapunk.

2. I_A -ra a következő egyszerű megfontolással is adhatunk nagyságrendi becslést. A szolenoid közepe táján az átmenő fluxust nagyon sok menetben folyó áram együttes hatása hozza létre. A vizsgált helyen levő egyetlen menet (mint körvezető) fluxusa annyiszor kisebb az egyemenetes szupravezető fluxusánál, ahányszor kisebb az I áram I_A -nál. Gyakorlatilag ugyanakkora fluxust hoz létre a szolenoid kiszemelt menete melletti egy-egy „körvezető” menet is. A távolabbi (néhány r -nyi távolságnál jóval messzebb levő) menetek azonban már egyre kevésbé járulnak hozzá a középső rész fluxusához, hiszen a mágneses terük „szétszóródik”, erővona-



laiknak csak kis része halad át a kiszemelt körlapon. A szolenoid néhányszor (mondjuk 1 vagy 2-szer) r hosszúságú szakaszán körülbelül 20-40 menet található. Ezek mágneses fluxusa akkor lesz ugyanakkora, mint az egyetlen szupravezető köráram fluxusa, ha I_A 20-40-szer erősebb, mint a szolenoid 1 mA-es árama.

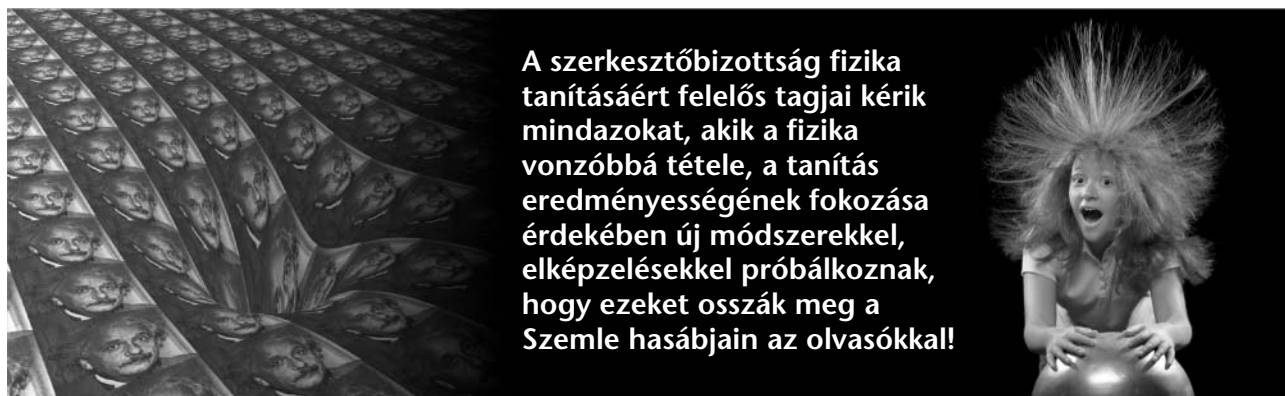
Fejezzük be ezt a négy részes visszatekintést egy olyan fotóval, amely Károlyházy Frigyes egyik előadásán készült [4]. A kép jelentése talányos, éppen olyan, mint egy Károlyházy feladat. Az előadó mosolyog, miközben a kezével is magyaráz, talán válaszol egy feltett kérdésre – de az is lehet, hogy már éppen befejezte az előadást, és vidáman búcsút int a hallgatóságának. Ez utóbbi jelentés mára szimbolikussá vált.

Károlyházy Frigyes elkészönt tőlünk, de írásaiban ránk hagyta fizikai szemléletét, emlékezetünkre bízta sok érdekes előadását. Megőrizzük emlékét, amíg csak tudjuk.

Radnai Gyula

Irodalom

1. Vermes Miklós: *Az Eötvös-versenyek feladatai I. 1959-1988.* Typotex, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1997, 163 o.
2. Radnai Gyula: *Az Eötvös-versenyek feladatai II. 1989-1997.* Typotex, Budapest, 1998, 131 o., <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/eotvos-versenyek/adatok.html>
3. <http://www.kfki.hu/education/verseny/eotvosverseny/report.html>
4. http://videotorium.hu/hu/recordings/details/252,Tunderkert_-_egy_kis_idotoltes_a_teridon



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

Az 55. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatónak a győri Széchenyi István Egyetem adott otthont 2012. április 27. és 30. között. Ennek egyik szünetében kérdezte meg a jelenlévőket *Sükösd Csaba* tanár úr, hogy kik jártak már a CERN-ben és hányan mennének vissza újra. Az érdeklődők magas száma adta meg a végső lökést, hogy én is jelentkezzem erre az útra.

2012 augusztusában 40 fizikatanár – köztük jómagam – kapott lehetőséget arra, hogy ötnapos továbbképzésen vehessen részt a svájci-francia határon épült CERN-ben (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire – Európai Nukleáris Kutatási Szervezet). Az utazást ugyan már hetedik alkalommal szervezte meg *Sükösd Csaba* és *Jarosievič Beáta*, ez az út mégis különleges volt, hiszen néhány hónappal korábban jelentették be a CERN kutatói, hogy nagy valószínűséggel megtalálták a Standard Modell *Peter Higgs* által a 60-as években megjósolt, de eddig hiányzó utolsó láncszemét, a Higgs-részecskét. Főként ehhez a kutatáshoz építették meg 100 méterrel a föld felszíne alatti 27 kilométer kerületű alagútban húzódó LHC-t (Large Hadron Collider – Nagy hadronütköztető) több milliárd euroért, ahol a tervek szerint akár 7 TeV (1 TeV = 1 billió elektronvolt = 10^{12} eV) energiájú ütközéseket is tudnak majd produkálni protonnyalábok között. Mivel a 7 TeV az ütköző protonok egyenkénti energiája, az ütközések teljes energiája akár 14 TeV-et is elérheti!

Az odafelé vezető utat a buszból látható érdekességek ismertetése és a társaság tagjainak rövid bemutatkozása színesítették. Kiderült, hogy általános, szakiskolai, szakközépiskolai és gimnáziumi tanárok is vannak köztünk, ráadásul nem is mind fizikaszakosak vagyunk, hanem biológia-, illetve kémiaszakosok is érdeklődnek az utazás iránt. Az éjszakát egy müncheni transzszálláson töltöttük, másnap reggel pedig a Rajnavízesés meglátogatása volt a program. A 150 méter széles és 23 méter magas vízesésen másodpercenként több mint 600 m^3 víz zúdul alá, nem kis robajjal. Hajóval lehetőségünk nyílt egészen közelről szemügyre

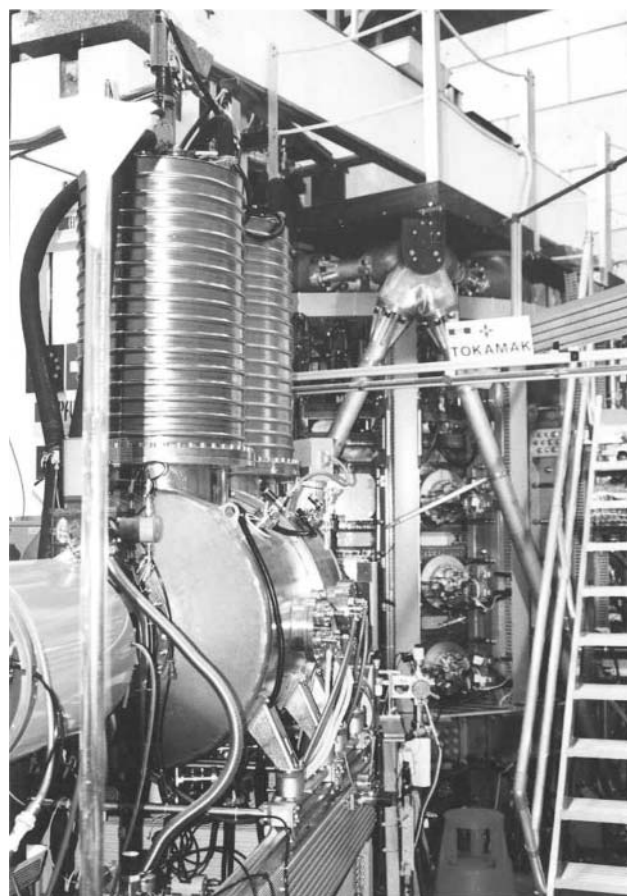


venni a hatalmas víztömeget, a legbátrabbak pedig a közepén kiemelkedő sziklán is partra szállhattak, hogy azután hosszan várakozzanak a lefelé jövőkre.

A CERN-ben

Ilyen előzmények után érkezünk meg a CERN-be, ahol a magyar kutatók szívélyesen fogadtak. Másnap reggel kezdődtek az előadások. Először a CERN bemutatását hallgathattuk meg *Horváth Dezsőtől*, aki vidám és barátságos házigazdánk volt egész héten. *Veszprémi Viktor* a gyorsítókkal, *Fodor Zoltán* a detektorokkal ismertette meg minket. Megismertük a fejlődésüket, történetüket, felépítésüket és működési elvüket, de igazából akkor került közel hozzánk ezen előadások anyaga, amikor mindezt élőben is megpillanthattuk. Itt is látható: nem elég az elmélet, szükséges és fontos a tapasztalás is! Mindezt egy *Bevezetés a részecskefizikába* előadás követte, ami többek szerint kezdődhetett volna egy kicsit alacsonyabb szintről is.

Hallhattunk előadást a nehézion-fizikáról *Fodor Zoltántól*, és a fizika gyógyítás szolgálatában szerzett érdemeiről *Sükösd Csabától*. Így ráébredhattunk, hogy a részecskefizika nem csak szép, de hasznos is.





Trócsányi Zoltán fantasztikus előadást tartott *Bevezetés a kozmológiába* címmel az anyag és antianyag egyensúlyának változásáról, a sötét anyagról, a sötét energiáról és még sok olyan dologról, ami a diákok fantáziáját is megmozgatja.

Természetesen itt létünket átítatta a Higgs-bozon megtalálása, pontosabban megtalálásának valószínűsége. Senki nem nyilatkozott róla biztosan, csak feltételesen. A mérések még folynak, és valószínűleg a Standard Modell hiányzó részecskéjét találták meg, amit Peter Higgs skót fizikus már a 60-as években megjósolt. Vannak olyan szakemberek, akik inkább egy szuperszimmetrikus részecskének örültek volna jobban.

Hallhattunk még előadást a CERN és a magyarok kapcsolatáról, így azokról a kísérletekről is, amelyekben hazánk fizikusai vettek (OPAL, L3) és vesznek részt (NA61, ALICE, CMS).

Délutánonként megismerkedhettünk a kísérletekkel. Először Lausanne-ba látogattunk, ahol a TCV tokamak, a fúziós plazmareaktor kísérlet megtekintése után megfogalmazódott a kérdés: mikor lesz ebből folyamatos energia? Már iskolai tanulmányaink során is folytak ilyen kísérletek, és akkor 30 évet mondtak.



Azóta eltelt a 30 év és most újra csak ezt halljuk. Talán az épülő ITER kísérlet rövidítheti meg ezt az időt.

Szillási Zoltán és *Béni Noémi* kíséretében látogattuk meg a Linac2 lineáris előgyorsítót, a LEIR nehézion-tárológyűrűt, valamint a CMS és ATLAS detektorok irányítótermeit. Az ATLAS látogatói központjában 3 dimenziós film segítségével mutatták be a detektor építését, érzékeltetve a hatalmas méreteket, majd lenézhattunk 100 méter mélyre, a detektor csarnokába is. Ezek a detektorok jelezték egy Higgs-szerű részecske megjelenését is.

Lehetőségünk nyílt még megtekinteni az LHC vezérlőtermét, valamint az évi mintegy 20 000 látogatónak készített Globe és Microcosm központokat – bár ezekre elég kevés idő maradt.

Nagyon hasznos volt az SM18 mágnesellenőrző állomás bemutatótermének meglátogatása, ami az előadáson szerzett ismeretek között teremtett rendet, valamint a Szillási Zoltán által vezetett kísérlet, ahol kis csoportokban működő ködkamrát építhettünk.

Debreczeni Gergely előadásából megtudhattuk, hogy a Webet a CERN-ben fejlesztették ki az információ gyors megosztására, és mára már annyira elterjedt, hogy elképzelhetetlen az élet nélküle. A Grid számomra újdonság volt, kiderült, hogy a Web továbbfejlesztett változata, ahol a számítógépek már nemcsak információkat, hanem tárterületet, adatbázist, alkalmazásokat és hálózati forgalmat is megosztanak egymás között.

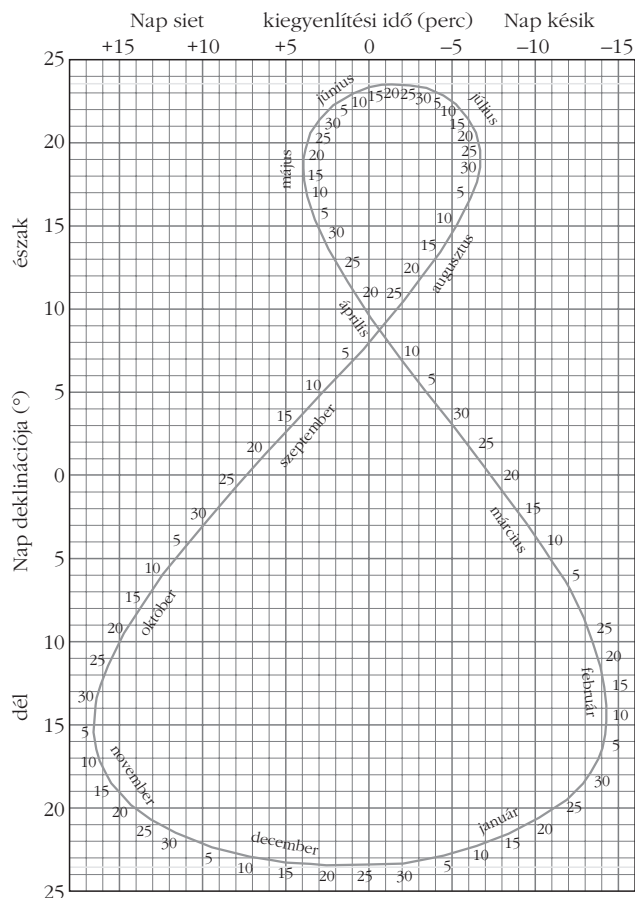
Mérések

A továbbképzést szervezők gondoskodtak arról, hogy már az utazás alatt sem unatkozhasunk. Csoportokba osztva különböző mérések elvégzésére nyílt lehetőség: Torricelli-kísérlet, víz forráspontjának meghatározása, hangsebesség mérése, környezeti háttérsugárzás, égbolt hőmérséklete, a barometrikus magasságformula kimérése, UV-sugárzás mérése, valamint a földrajzi helyzet meghatározására bárki által beszerezhető, egyszerű eszközökkel.

Jules Verne művei gyermekkorom kedvenc olvasmányai közé tartoztak, időnként még most is beleolvasok egy-egy kötetébe. Bár én még Verne Gyulaként ismertem meg az író – csalódtam is kicsit, amikor kiderült, hogy nem honfitársunkról van szó.

Gyakorló fizikatanárként legutóbb a hőmérsékleti skálák taglalásánál hoztam szóba a nevét. A Celsius- és a Kelvin-skálákat a diákok általában már általános iskolában megismerik, de középiskolában fizikátörténeti érdekességként elmondom nekik a Fahrenheit- és a Réamur-skálák keletkezését és alappontjait is.

Mivel Verne könyveiben gyakran találkozhatunk a Fahrenheit-skála említésével, megkérdeztem, hogy hányan olvasták már a *Rejtelmes sziget* című regényt. Senki nem jelentkezett. „De Jules Verne nevét csak hallottatok már, ugye?” – kérdeztem reménykedve. Ekkor ketten jelentkeztek bátortalanul, remélem nem csak elkeseredésemet akarták csökkenteni... Az aktuális magyar celebekről biztos több információhoz juthattam volna tőlük, csak őket sem a hőmérsékleti skálákhoz, sem a fizika más területeihez nem tudtam volna kapcsolni.



A földrajzi helyzet meghatározására vonatkozó mérésről először Verne Gyula: *Rejtelmes sziget* című könyvében olvastam a 13. és 14. fejezetben, amikor Cyrus Smith a Lincoln-sziget helyzetét határozta meg. Ő a szélességi fok meghatározásához egy körzöre emlékeztető szerzámot készített. Ennek egyik szárát a tengeri láthatárra, másik szárát a Dél Keresztje csillagkép déli pólushoz legközelebb eső csillagára állította, amikor az a délkör legmélyebb pontjára ért. Mivel ismerte e csillag déli sark irányától való eltérését, ezzel korrigálta mérését. Az így kapott szögtávolságot visszavezette a tenger szintjére (háromszögeléssel lemérve a fennsík magasságát, ahonnan a megfigyelést végezte), így megkapta a déli pólus láthatár feletti magasságát, azaz a szélességi fokot. Az északi félgömbön ez a mérés például az Északi Sarkcsillag segítségével valósítható meg.

De az éjszaka csillagai helyett a Nap delelését is segítségül hívhatjuk, eszközünk pedig egy függőlegesen felállított pálca: a gnomón. A Nap delelése idején a pálca árnyékának és hosszának hányadosa éppen a keresett szélességi fok tangense. Sajnos ez csak az őszi és tavaszi napéjegyenlőség idején végzett mérésekre igaz. Ha nem ezeken a napokon végezzük a mérést, akkor a Föld tengelyferdeségéből adódóan a sugarak az Egyenlítő síkjával is szöget zárnak be. Ennek értékét le kell vonnunk a korábban számolt szögből. De mekkora is ez az érték? Ez a szög a deklináció, ami napról-napra más és más. Az aktuális érték megkapható az analemmáról, ami a görög *αναλημμα* szóból ered és kiegyenlítést, javítást, helyesbítést jelent. Ez a csillagászati időmeghatározásban használatos grafikon felrajzolható, ha egy éven keresztül figyeljük a gnomón árnyékának végét, és minden délben megjelöljük. Az így kapható elnyújtott nyolcas alakú görbéről már le lehet olvasni a deklináció értékét. E helyett a hosszadalmasnak tűnő eljárás helyett azonban megnézhetjük egyszerűen a Csillagászati évkönyvben is az aktuális napra vonatkozó szöveget. Nos, Cyrus Smith-nek erre még nem volt lehetősége...

A földrajzi hosszúság meghatározásához már ugyanazt a módszert használhatjuk, mint Cyrus Smith mérnök. Mivel megegyezés szerint a 0. hosszúsági kör a greenwichi, a Föld pedig óránként 15°-ot fordul el, ezért a feladat a delelés időpontjának – vagyis amikor legrövidebb az árnyék – pontos meghatározása. Ez a greenwichi idővel összevetve 4 perccenként 1°-ot jelent.



A Föld azonban nem egyenletesen halad a pályáján, így két delelés között sem telik el mindig ugyanannyi idő, azaz a delelés időpontja naponta más és más lesz. Csak 4 nap van az évben, amikor a delelés ténylegesen az úgynevezett középidő szerinti délben történik: április 16., június 14., szeptember 1. és december 25. A többi napon az időkiegyenlítés értékeit ismét az analemmából határozhatjuk meg. Az analemma értékei a Föld egyetlen pontjára vonatkoznak: a „0” szélességi, és a „0” hosszúsági fok koordinátákkal rendelkező pontra, a „középidő” szerinti deleléskor. Ezért tudjuk éppen ehhez a ponthoz viszonyítva meghatározni helyzetünket, amikor az analemmát használjuk.

Jules Verne hőse „szerencsés” helyzetben volt, mérését április 16-án végezte és még a nyári időszámítással kapcsolatos óráállítással sem kellett vesződnié...

Mi a mérésünket itthon, a Rajna-vízesésénél és a CERN-ben is elvégeztük.

Kirándulások

Egyik délután ötletes formában ismerkedtünk meg Genf városával: Egy térkép és kijelölt útvonal segítségével kellett megadott helyszíneket felkeresnünk és kérdésekre válaszolni, amit utolsó este a házigazdáink értékeltek. Láthattuk a Reformáció Emlékművét, ahol egy híres magyar is található, *Bocskay István*; a Városházát, amelynek udvarán nyaranta szabadtéri koncerteket rendeznek, és egyik termében írták alá a Vöröskereszt Alapító okiratát 1864-ben. Megcsodálhattuk Genf panorámáját a Saint Pierre katedrális tornyából





és természetesen Genf legnevezetesebb látványosságát, a szökőkutat sem hagytuk ki, ami másodpercenként 500 liter vizet lövell a magasba. A Genfi-tó partján láthattuk *Rousseau és Erzsébet* királyné, Sissi szobrát. A királynő egy hajókirándulásra igyekezvén itt esett merénylet áldozatául.

Utolsó nap – rengeteg elfoglaltsága ellenére – látogatásával megtisztelte a csoportot *Rolf-Dieter Heuer* professzor úr, a CERN főigazgatója, aki szívesen és készségesen válaszolt kérdéseinkre.

A hazautazás során útba ejtettük a Mont Blanc-t, Európa legmagasabb hegycsúcsát. Verőfényes napsütés, magas hőmérséklet (és magas UV) fogadott bennünket, még a 3842 méter magas Aiguille du Midi tetején sem volt szükség kabátra. Fantasztikus kabinos túrát tettünk a 3462 méter magas, már olasz oldalon lévő Point Hellbronner tetejére, a gleccser felett, és még Chamonix nyüzsgő utcáscskáin is sétálhattunk egyet.

FIZIKA A JÁNOS-HEGYEN

Vetélkedő gimnazistáknak

Az utóbbi időben egyre gyakrabban hallunk arról a súlyos problémáról, hogy a természettudományok, elsősorban a fizika és a kémia, teljesen elvesztették népszerűségüket a diákok körében. Nehéznek, életidegennek, feleslegesnek tartják. Sok tanárkolléga dolgozik e helyzet változtatásán és szerencsére egyre több sikeres kezdeményezésről hallunk. Itthon és külföldön egyre többen próbálkoznak azzal, hogy a fizika egyes részeit alkalmanként az osztálytermen kívül, az iskolaudvaron, parkban, játszótéren vagy akár a természetben tanítsák. Saját tapasztalatom is azt mutatja, hogy csupán a rutintól, a megszokott formáktól való eltérés, az osztályterem falai közül való kimozdulás már érdekesebbé, izgalmasabbá teszi a fizika tantárgyat. Ha a kísérletezés, mérés és a hozzájuk kapcsolt problémamegoldás a gyakorlati élethez köthető, akkor az rögtön értelmet nyer. Ilyen céllal szervezetünk egy

Az út véget ért. Jelenleg úgy érzem magam, mint egy detektor. Egy héten keresztül tömény, hatalmas mennyiségű adat zúdult rám, most pedig itt az ideje a rendszerezésnek és a kiértékelésnek. Mit és milyen formában tudok diákjaim és érdeklődő kollégáim számára is érthető információt átadni ebből a hatalmas adathalmazból? Ez lesz a következő feladat.

Köszönetnyilvánítás

Befejezésül köszönettel tartozunk az utazás és a program megszervezéséért Jarosievitz Beátának és Sükösd Csabának, CERN-i vendéglátóinknak, és természetesen az út szponzorainak: Jövőnk Nukleáris Energetikusáért Alapítvány, MTA Wigner Kutatóközpont, Ericsson Hungary, Eötvös Loránd Fizikai Társulat, CERN és DACHS Computing & Biosciences Hungary.

Gallai Ditta
BME Két Tanítási Nyelvű Gimnáziuma

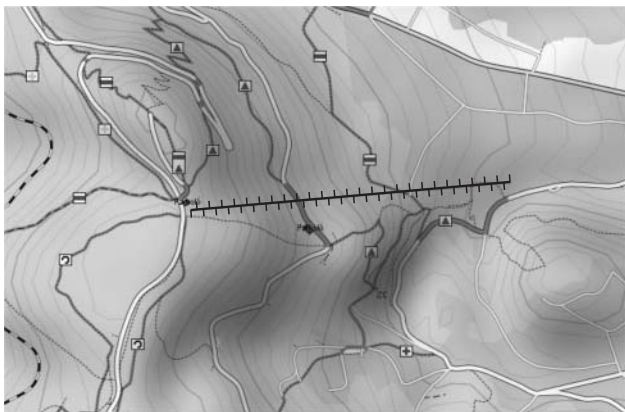
félnapos fizikavetélkedőt iskolánkban, a BME Két Tanítási Nyelvű Gimnáziumában. Az iskola egyes osztályaiból alakult négy fős csapatoknak a János-hegyi Libegőn és környékén kellett egyszerű eszközökkel és némi ötletességgel kísérleti feladatokat, méréseket, elemi számításokat elvégezniük. A fogadtatás abszolút pozitív volt. Nagy örömmre szolgált látni azt a lelkesedést, ahogy a diákok nekikezdték egy-egy új feladat megoldásának. Az egész délután érdemi munkával, ugyanakkor remek hangulatban telt. Még azok a tanulók is örömmel vettek részt a programban és próbáltak hozzájárulni csapatuk sikeréhez, akik az osztályteremben kevés érdeklődést mutatnak.

Az alábbiakban e vetélkedő feladatait ismertetem azzal a kifejezett céllal, hogy a cikket olvasók kedvet (esetleg ötleteket) kapjanak hasonló programok szervezéséhez.

Előkészítésként a diákoknak csak a kirándulást, versenyt, közös kísérletezést, a „jó bulit” hangsúlyoztuk, a konkrét feladatokat nem ismerték. A program önkéntes részvétel alapján (és némi jutalom ígéretével) a napi tanítás után, délután kettőkor indult a Libegő zugligeti állomásától és alkonyodott, mire ugyanide visszaérkeztünk.

Térképismeret, távolságbecslés

Helyszín: a Libegő zugligeti állomása. Feladat: a szintvonalakat is feltüntető térkép (a szintvonalak 10 m szintkülönbséget jelölnek), valamint a szextánssal elvégzett mérés alapján becsüljétek meg a libegő hosszát! Jelöljétek be a térképen az északi irányt és adjátok meg a térkép léptékét! (Munkaidő 10 perc.)

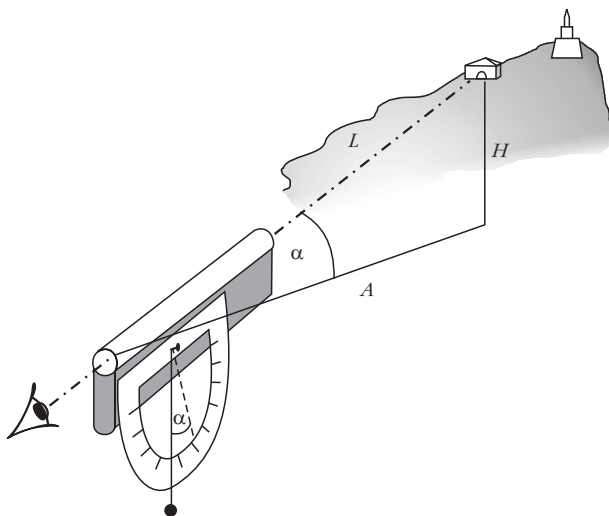


A térkép a szintvonalakkal. A Libegőt külön kiemeltük.

A feladat megoldásához a helyszínen minden csapat a túra helyszínét mutató turistatérképet, tájolót valamint egy házilagosan készített, egyszerű szextánst kapott.

Megoldás: a lift egyenes nyomvonala a térképen 25 szintvonalat metsz, a szintkülönbség tehát a térkép alapján 250 m-nél több, $H \approx 260$ m (a hivatalos érték 262 m).

A házi készítésű szextáns.



A szextánssal az *ábra* szerint mérhető a felső állomás α látószöge ($\alpha \approx 15^\circ$), így a berajzolt derékszögű háromszög alapjának és átfogójának hossza egyaránt meghatározható.

Az átfogó jó közelítéssel adja a pálya hosszát:

$$L \approx \frac{H}{\sin \alpha} = 1012 \text{ m.}$$

(A valódi hossz a drótkötél lógása miatt ennél több: 1040 m).

A háromszög alsó befogója a pálya térképre rajzolt vízszintes vetületét jelenti

$$A \approx \frac{H}{\tan \alpha} = 978 \text{ m,}$$

ami a térkép léptékeként is használható.

A térképek szokásos tájolása É-D irányú, de a kiosztott térképrészlet esetén ez nem így volt. A valós É-D irányt a tájoló segítségével lehetett meghatározni és berajzolni a térképre.

„Libegő-fizika”

Helyszín: a lift (hogyan az utazás hosszú 12 perce se teljen tétlenül). Feladat: legalább két módszerrel határozzátok meg az ülőlift sebességét, valamint szállítási kapacitását! Számítással becsüljétek meg a hajtómotor maximális hasznos teljesítményét! Utazás közben figyeljétek meg, hogy a székeket szállító drótkötél a pályát tartó oszlopok csigakerekre hol alulról, hol felülről fekszik fel. Magyarázzátok meg, mitől függ a drótkötél vezetése! Munkaidő: indulás előtt 5 perc felkészülés, az utazás teljes időtartama, a kiszállás után 10 perc a befejezésre.

Megoldás:

Sebességmérés

A mozgó lift sebességének meghatározására több módszer is kínálkozik:

I. Az 1. feladatból ismert a pálya hossza. A teljes menetidőt ($T = 12$ perc) megmérve, az átlagsebesség egyszerűen számolható:

$$v = \frac{L}{T} = \frac{1040}{12 \cdot 60} \approx 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

II. Megméri két szék távolságát ($d \approx 20$ m) és azt az időtartamot, ami a szembe jövő kötél két egymást követő szék elhaladása közt eltelik ($\tau \approx 7,8$ s). Ezekből az adatokból a szembe menő székek relatív sebessége – ami a haladási sebesség kétszerese – számolható. Tehát a kérdéses sebesség:

$$v = \frac{d}{2\tau} = \frac{20}{2 \cdot 7,8} = 1,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

(Két mozgó szék távolságának megmérése nem triviális. Történhet például a következőképpen: a csapat tagjai két egymást követő széken utaznak és menet közben egy zsineget feszítenek ki a két szék között. A zsineget csomóval megjelölik a két szék távolságát, majd a liftből kiszállva megméri a kérdéses hosszát.)

III. Az indító állomáson megméri, mennyi idő telik el két egymás utáni szék elhaladása között ($t = 15,4$ s). Ha ismert a két szék távolsága, akkor a sebesség könnyen számítható: $v = 1,29$ m/s.

(A különböző módszerrel meghatározott sebességértékek eltérése mérési hibából adódik.)

A lift kapacitása

A drótkötélpálya teljes hossza $2L \approx 2080$ m, ezen 20 méterenként vannak rögzítve a székek, tehát összesen 104 szék. A 12 percnyi menetidő alatt 52 szék, azaz 104 ember juthat fel a völgyből a hegyre. Ez óránként 520 embert jelent.

A lift hasznos teljesítménye

Tegyük fel, hogy hegymenetben a kihasználtság 100%, azaz minden székben két ember ül. A felső állomáson átlagosan $t = 16$ másodpercenként kiszáll két utas, miközben az alsó állomáson beszáll két másik. A lift így 16 másodpercenként juttat fel két embert a $H = 262$ m magas hegyre. Az ezzel járó emelési munka, ha egy embert 75 kg tömegűnek tekintünk:

$$W = m g H \approx 2 \cdot 75 \cdot 10 \cdot 262 = 393 \text{ kJ.}$$

A lift hasznos teljesítménye:

$$P = \frac{W}{t} \approx 24,6 \text{ kW.}$$

Tíz perces adatgyűjtés a Libegőről és az Erzsébet-kilátóról

Helyszín: a Libegő felső állomása. Feladat: szerezzetek minél több információt a Libegőről és a kilátóról (a műszaki adatokra koncentrálva), majd írjatok rövid összefoglalót a témáról! (A feladat megoldásához bármilyen segédeszköz megengedett, munkaidő 10 perc.)

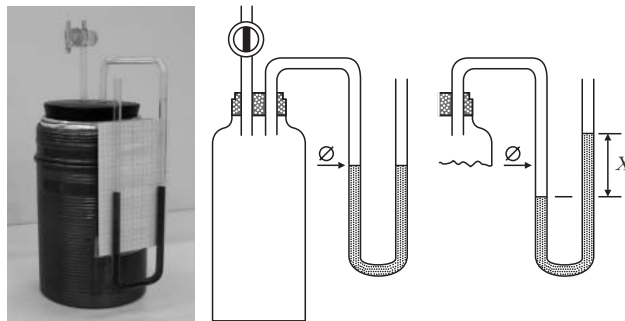
A feladatnak nincs közvetlen kapcsolata a fizikával. Azért került be a feladatok közé, hogy ezáltal is bővítsük az iskola külföldi diákjainak országismeretét. A feladat a diákok helyzetfelismerő képességét, leleményességét és kommunikációs képességét teszi próbára.

A liftállomás és a János-hegyi Erzsébet-kilátó szintkülönbségének meghatározása a barometrikus nyomáscsökkenést mérő házi készítésű eszközzel

Helyszín: a lift felső állomásától a kilátótoronyig.

Bevezetésként megmutattuk a magunkkal hozott egyszerű barométert, ismertettük működését és a mérés alapelvét. Ezután – minthogy csak egyetlen mérőeszköz állt rendelkezésre – közös mérés következett.

A liftállomáson a termoszon lévő csap elzárásával indítottuk a mérést és az eszközzel felgyalogoltunk a János-hegy csúcsán lévő kilátóhoz. A magasság növekedtével a légköri nyomás csökken, a palackban lévő



Az egyszerű termoszos barométer.

nyomás azonban változatlan, ezért a termoszal közlekedő manométerágban a vízszint lassan süllyed, míg a nyitott ágban emelkedik. A közös mérés végeredménye szerint a folyadékszintek különbsége a hegytetőn 95 mm volt.

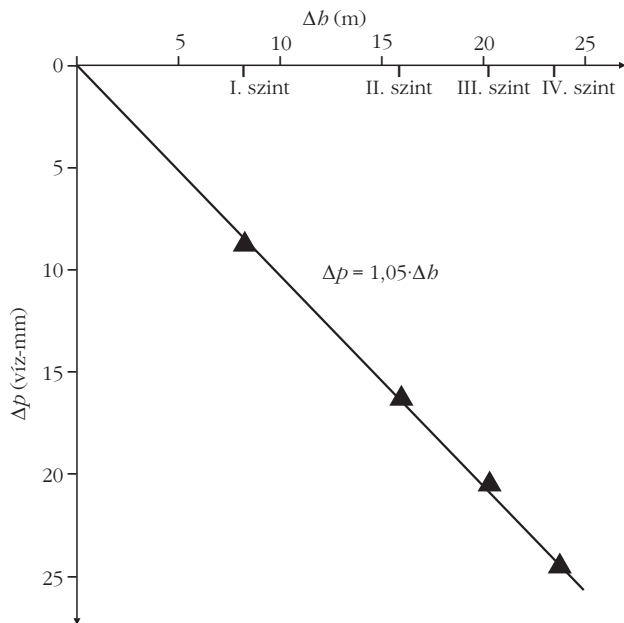
Az Erzsébet-kilátónál következett a feladat második része: a nyomásmérő kalibrálása, kihasználva, hogy a torony szintjeinek magassága ismert.

Az Erzsébet-kilátó aljában a csap kinyitásával nulláztuk az eszközt, majd a csapot elzárva elindultunk a kilátótoronyba. A torony 4 különböző szintjén leolvastuk a vízszintkülönbséget és feljegyeztük a szintek magasságát, amit a toronyban lévő egyik információs tábla megadott. Ezután következett a csapatfeladat.

Feladat: a rendelkezésre álló négyzethálós lapon készítsétek el a vízszintkülönbség–magasságkülönbség kalibrációs grafikont! Feltételezve, hogy a légnyomás magasságfüggését a liftállomás és a kilátó közt a kalibrációs grafikonnak megfelelő függvény írja le, határozzátok meg a liftállomás és a hegytető szintkülönbségét! (Munkaidő a kalibráló mérés és grafikon elkészítésére 15 perc.)

Az Erzsébet-kilátó. A barométer kalibrációjához használt négy szint kökerítései könnyen észrevehetőek.





Az Erzsébet-kilátón felvett kalibrációs grafikon.

Megoldás: az Erzsébet-kilátó földszintjén nullázott barométerrel a négy ismert magasságú szinten elvégzett nyomásmérés vízszintkülönbségét a *táblázat*, illetve az ennek alapján elkészített kalibrációs grafikon mutatja. Mérésünk szerint a kalibrációs grafikon egyenes. Feltételezve, hogy a függvény képe a Libegő-állomás és a kilátó közti nagyobb szintkülönbség esetén sem változik, a kalibrációs grafikon meredeksége alapján kiszámítható a mért x vízszintkülönbséghez tartozó magasságkülönbség. (A tényleges szintkülönbség 96 m.)

	I. szint	II. szint	III. szint	IV. szint
Δb (m)	8,15	15,96	20,15	23,5
Δp (mm)	8,5	16,5	20,8	24,8

Megjegyzés: a légnyomás magasságfüggése csak kis magasságkülönbségek esetén adódik lineárisnak. Nagy magasságkülönbségek esetén a közismerten exponenciális barometrikus magasságfüggvényt kapnánk. Az általunk mért egyenes az exponenciális függvény meredekségét jelzi az János-hegy magasságában.

A légnyomás magasságfüggésének kérdéskörére a fizikaórán érdemes visszatérni, hiszen a verseny szűkre szabott időkerete nem teszi lehetővé a részletesebb magyarázatot.

Csoki a toronyban (számítási feladat)

Helyszín: az Erzsébet-kilátó előtti terasz. Feladat: számoljatok utána, hogy megéri-e csapatotoknak felmászni az Erzsébet-kilátó tetejébe egy Sportszeletét! (A csokipapíron fel van tüntetve a Sportszelet energiaértéke. Fontos tudni, hogy az emberi szervezet a táplálékkal bevitt energiának csak csekély hányadát, körülbelül 5%-át tudja hasznos munkavégzésre fordítani. Munkaidő 10 perc.)

Megoldás: 3 Sportszelet energiaértéke 1780 kJ. Ez az érték az emberi szervezet hatásfokát figyelembe véve $1780 \cdot 0,05 = 89$ kJ emelési munkavégzést fedez. A kilátótorony $h = 23,5$ m magasságát számításba véve, ez $89000:235 = 378$ kg tömeg felemelését jelenti. A csapatnak akkor éri meg felmászni a toronyba, ha a csapatot alkotó diákok összesített testtömege nem haladja meg ezt az értéket.

Mérleghinta

Helyszín: a közelben található erdei gyerekjátszótér. Feladat: a játszótéri mérleghinta és mérőszalag segítségével határozzátok meg (lehetőleg minél pontosabban) fizikatanárotok súlyát! Becsüljétek meg a mérés hibáját! (A tanár passzívan részt vesz a mérésben, azaz némán követi az utasításokat. Munkaidő 15 perc.)

Megoldás: a mérés lényege a hinta kiegyensúlyozása. Ez sokféle módon történhet (Például az egyik oldalra felül a tanár, a másikra egy vagy két diák, akiknek súlya ismert.) Ezután a hintán ülő személyek tengelytől mért távolságát kell mérőszalaggal lemérni, és a forgatónyomatékokkal számolni.

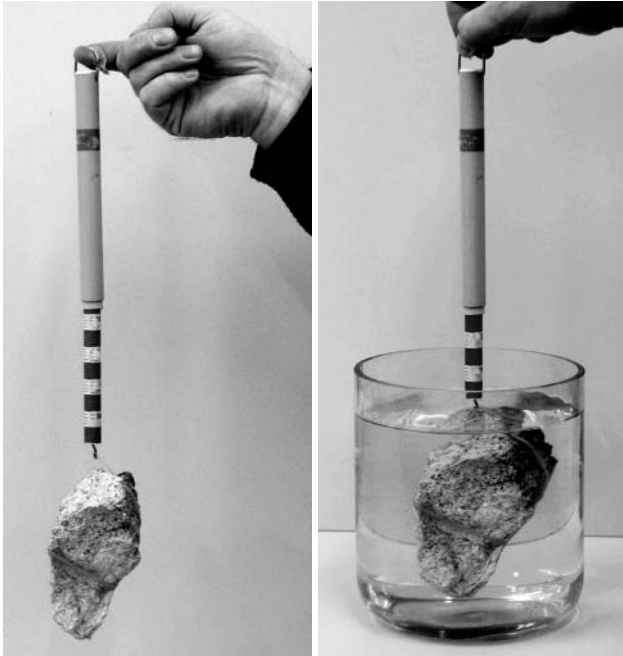
A mérés hibáját a távolságmérés hibája és a tengelysúrlódás hatása adja. A mérleghintán helyet foglaló személy – mivel tenyérnyi felületen ül – súlyerejének támadáspontja csak körülbelül 10 cm-es pontossággal becsülhető. A mért eredményt szintén befolyásolja, hogy a személyek mennyire dőlnek előre/hátra a hintán. A tengelysúrlódás hatása jó esetben (precíz csapágyazás) nem jelentős. Mindezt figyelembe véve a tanár testtömege 10-15% pontossággal volt meghatározható.

Miből van a Tündér-szikla?

Helyszín: a János-hegyről Zugligetbe vezető turistaút mellett található Tündér-szikla. Feladat: a rendelkezésre álló rugós erőmérő és egy vízzel töltött játékvödör segítségével végezzetek méréseket és határozzátok meg a Tündér-szikla anyagának vízhez viszonyított relatív sűrűségét! (A méréshez a szikla aljában található kisebb kőzetdarabokat használjátok, amelyek korábban letöredeztek a tömbről! A víz sűrűsége 1 g/cm^3 , a kődarab dinamóméterre történő felerősítéséhez vékony drót áll rendelkezésre.)

kőzet	sűrűség (g/cm^3)
andezit	2,8–3,2
bazalt	2,5–2,8
dolomit	2,1–2,5
édesvízi mészkő	1,4–2,3

A kapott eredményt a fenti *táblázat* kőzeteinek sűrűségadataival összehasonlítva állapítsátok meg milyen kőzet a Tündér-szikla anyaga! (Munkaidő 15 perc.)



Kő súlyának és térfogatának mérése rugós erőmérő és vizes edény segítségével.

Megoldás: a kiválasztott követ a rugós erőmérőre akasztjuk és leolvassuk a rugó megnyúlását (X_1). Ezután a rugóra akasztott követ a vizes edénybe merítjük, úgy hogy a víz ellepje a követ, és ismét leolvassuk a rugó megnyúlását (X_2). A mért megnyúlások segítségével a kő sűrűsége meghatározható.

Az első mérés szerint:

$$DX_1 = \rho_{k\ddot{o}} Vg,$$

ahol D a rugóállandó, V a kő térfogata, $\rho_{k\ddot{o}}$ a sűrűsége. A második mérés szerint:

$$DX_2 = \rho_{k\ddot{o}} Vg - \rho_{v\ddot{i}z} Vg = (\rho_{k\ddot{o}} - \rho_{v\ddot{i}z}) Vg.$$

A két egyenlet alapján a kő sűrűsége meghatározható:

$$\rho_{k\ddot{o}} = \frac{X_1}{X_1 - X_2} \rho_{v\ddot{i}z}.$$

A kőzet sűrűsége $2,4 \text{ kg/dm}^3$, anyaga a Budai-hegységre jellemző *dolomit*.

Vizes rakéta

Helyszín: a Libegő alsó állomásánál lévő parkoló.

A vetélkedő utolsó, és egyben leglátványosabb kísérlete, műanyag üdítő palackból készített rakéta kilövése volt. A csapatok elsődleges feladata a (két-szer megismételt) kísérlet megfigyelése volt, ezután kapták meg az elméleti kérdéseket, amelyekre rövid írásbeli válaszokat kellett adni.

A kísérlet: rakétaként 2 literes, vastag falú üdítő PET-palack szolgált. A műanyagpalack 6-7 atmoszféra túlnyomást is elvisel, tömege viszont csupán $m = 40 \text{ g}$.

Az üres palackba nagyjából 0,5 liter vizet öntöttünk, majd erősen ledugaszoltuk. A dugóba egy körülbelül 25 cm hosszú fémcső illeszkedett és a cső kiálló végére nyomásálló, 2 m hosszú locsolócső csatlakozott. A locsolócső másik végét kerékpárszelep zárta le. A dugón átvezetett cső a palack szájával lefelé fordított helyzetében a vízszint fölé nyúlt be.

Az így előkészített rakétát szájával lefelé fordítva a masszív „kilövőállványba” helyeztük, majd egy vállalkozó szellemű diák autópumpával levegőt pumpált a palackba. A pumpán lévő nyomásmérő mutatta miként nő a palackban a levegő nyomása. A szoros dugó körülbelül 5,3 bar túlnyomásig kitartott, majd ott engedett. A bezárt levegő nyomása kilökte a dugót és a palackban lévő vizet, aminek következtében a palack a magasba emelkedett.

Feladatok:

1. Milyen fizikai törvény használható fel a rakétakísérlet értelmezésére? Magyarázzátok meg a palack levegőbe emelkedését!

2. A rakétánk vízzel és levegővel működik.

a) Működne-e a rakéta víz nélkül, csak a bepumpált levegővel? Miért?

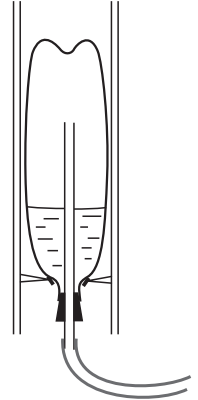
b) Működne-e a rakéta, ha majdnem teletöltenénk vízzel és úgy pumpálnánk bele levegőt? Miért?

3. A rakéta pályáját illusztráló rajzon három helyzetet jelöltünk meg (a maximális emelkedési magasságot, illetve a maximális emelkedési magasság felét a pálya felszálló és leszálló ágán). Rajzoljátok be a rakétára ható erőket (vektorokat) mindhárom pontban!

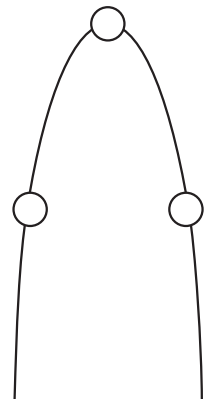
4. Mitől függ a palack emelkedési magassága?

5. Tegyük fel, hogy a maximális emelkedési magasság 20 m volt. A rakétának legalább mekkora kezdősebességgel kellett indulnia? Ehhez képest vajon mekkora sebességgel ért földet? Miért?

Munkaidő 15 perc.

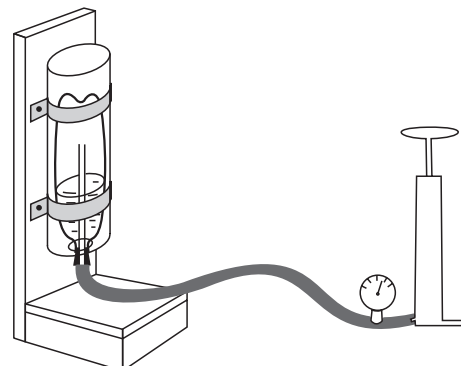


A vizes rakéta.



A rakéta pályája.

A rakéta a kilövőálláson.



Megoldás:

1. A rakétakísérlet az impulzus-megmaradás törvényével értelmezhető. Az impulzus-megmaradás tétele szerint, ha a nagy tömegű víz lefelé lökődik, akkor a lényegesen könnyebb palacknak nagy sebességgel fel kell repülnie.

2. a) Működne, de alig emelkedne fel. A palack emeléséhez szükséges a kiáramló víz tömege.

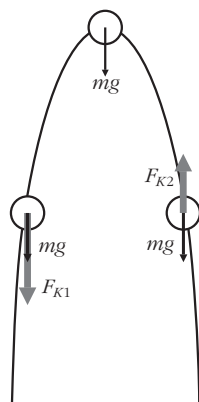
b) Nem. Túl nagy lenne a kezdeti össztömeg, illetve túl kicsi a bezárt levegő mennyisége ahhoz, hogy a vizet kellő sebességgel kinyomja a palackból.

3. Lásd az *ábrát!* F_{K1} és F_{K2} a sebességtől négyzetesen függő közelegellenállási erő.

4. A palack emelkedési magasságát a teljes vízmennyiség kilökődésekor értendő kezdősebesség, az üres palack tömege és a légellenállás hatása szabja meg. A kezdősebesség a palackba töltött víz és levegő mennyiségi arányától és a bepumpált levegő maximális nyomásától függ. A maximális nyomást a palackot lezáró dugó sűrűlény szabja meg.

5. Ha a légellenállástól eltekintünk, akkor 20 m-es emelkedéshez

$$v_0 = \sqrt{2hg} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



A pálya az erőkkal.

kezdősebesség kellene. A légellenállás miatt azonban ennél jóval nagyobb kezdősebesség szükséges. Mivel felfelé menetben a lassulás abszolút értéke nagyobb (mind a gravitáció, mind a légellenállás lassítja), mint lefelé jövet a gyorsulás (a gravitáció gyorsítja, de a légellenállás ellene dolgozik), ezért földet éréskor kisebb a sebesség, mint kilövéskor.

Megjegyzés: a vizesrakéta-kísérletet érdemes videóra venni. A felvétel segítségével (utólag az iskolában) méréseket is végezhetünk. A videót kockánként vetítve (a felvételi sebesség ismeretében) mérhető a víz kiömlési ideje, az emelkedés és a visszaesés időtartama, becsülhető a rakéta emelkedési magassága (ezt a parallaxishiba nehezíti). Az idő és az egymást követő kockákon mérhető elmozdulásból meghatározható a rakéta maximális sebessége is.

Irodalom

1. Öveges J.: *Kísérletezzünk és gondolkozzunk*. Móra Kiadó, 2011.
2. Budó Á.: *Kísérleti fizika*. Tankönyvkiadó, 1970.
3. *Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen*. ELTE, Fizika Doktori Iskola, 2010.
4. <http://www.ikispal.hu/fizikustabor.htm>
5. <http://tlc.howstuffworks.com/family/fun-physics-activities-for-kids.htm>
6. <http://www.northwestu.edu/photo/#/outdoor-physics-experiment>
7. <http://www.iopblog.org/outdoor-physics-grounds-learning-conference>
8. http://www.outlab.ie/forums/documents/the_outdoor_physics_project_as_curriculum_development_for_students_oleg_popov_532.pdf
9. http://www.science-on-stage.de/media/materialien/pos_gesamt/Apell_outdoor_physics_full_text.pdf

EGY TOVÁBBFEJLESZTETT HULLÁMKÁD

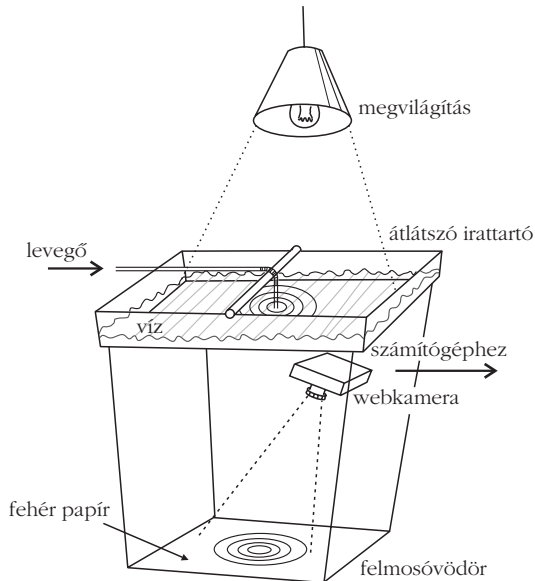
Piláth Károly
ELTE Trefort Ágoston Gyakorlóiskola

A győri Fizikatanári Ankéton mutattam be egy olyan hullámkádat, amelyben egy hagyományos hullámkádat házasítottam össze a modern multimédiás lehetőségekkel. Az alábbi cikkben számolnék be a berendezés elkészítésének részleteiről és felhasználásának lehetőségeiről.

Tanítási gyakorlatomban azt tapasztaltam, hogy a tanulók nagyon szeretik, és általában meg is értik a hagyományos hullámkádakkal bemutatott kísérleteket, de a vetített képek láthatósága egy egész osztály számára általában már nem megfelelő. Azt gondoltam, hogy ezen könnyen segíthetek, ha a vetítőernyő képét egy webkamera és egy projektor segítségével nagy méretben kivetítem. Az ötlet azonban nem váltotta be a hozzá fűzött reményeimet, ezért terveztem egy olyan hullámkádat, amely házilagosan is könnyen elkészíthető és a fizikaórákon is kényelmesebben használható, mint egy hagyományos hullámkád. Külön előnye, hogy e házilagos eszköz előállítási költsége csak töredéke a profi berendezések árának.

A kád egy víztiszta műanyagból készült, A4-es méretű lapok tárolására használható irattartó tálca. A berendezés váza egy téglalap alapú műanyag felmosóvödör, amelynek olyan a mérete, hogy az irattartó lefedje a tetejét. A vetítőernyő egy, a vödör aljára helyezett A4 méretű fehér írógéppapír. A berendezés vázlatos rajza az *1. ábrán* látható.

Az átvilágítást egy 220 V, 5 W teljesítményű LED-es spotlámpával oldottam meg (*2. ábra*). A hullámkeltről a számítógéphez csatlakoztatható hangszórókból kivezetett levegő nyomáshullámai gondoskodnak. A hangszórókat egy hanggenerátor-program segítségével vezéreljük. A kivetítés a felmosóvödörbe szerelt, a vetítőernyőt néző webkamera segítségével történik. Így stroboszkópra sincs szükség, mert a webkamera mintavételezésének a hanggenerátorhoz történő szinkronizálásával mindig a megfelelő pillanatban készíthető felvétel. Külön előny, hogy a webkamera képe egy erre a célra írt programmal tovább elemezhető, így az interferenciahelyek intenzitáseloszlása is megrajzolható.

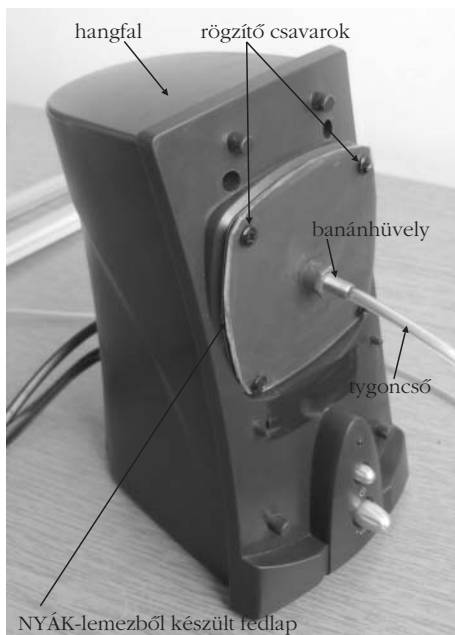


1. ábra. A berendezés elvi vázlatja.

A rezgékeltő

Az általam tervezett hullámkád lelke a rezgékeltő, amely mechanikus gerjesztés helyett számítógéppel vezérelt hangszórók által keltett nyomáshullámokkal gerjeszti a vizet. Ezt úgy alakítottam ki, hogy a számítógépekhez kapható hangfalak előlapját leszereltem és a hangszórók elé – egy a hangszórók méretéhez illeszkedő – hermetikusan záró lapot illesztettem. E lapok anyagukat tekintve 1 mm vastag plexiből, vagy NYÁK-lemezből készülhetnek. Ezt a fedőlapot a hangszórók rögzítéséhez használt négy csavarral erősítettem a hangszórók elé. A fedőlapok súlypontjába egy 6 mm átmérőjű lyukat fúrtam, amelybe egy 4 mm belső átmérőjű banánhüvelyt csavaroztam. Ehhez a banánhüvely-

3. ábra. A rezgékeltő.



2. ábra. A vetítőlámpa.

hez csatlakoztatható az a flexibilis, tyongumiból készült cső, amely a hangszórók által keltett nyomáshullámokat eljuttatja a vízhez (3. ábra). Arra azért ügyeljünk, hogy a banánhüvely hangszóró felőli oldala ne akadályozza a hangszórómembrán szabad mozgását.

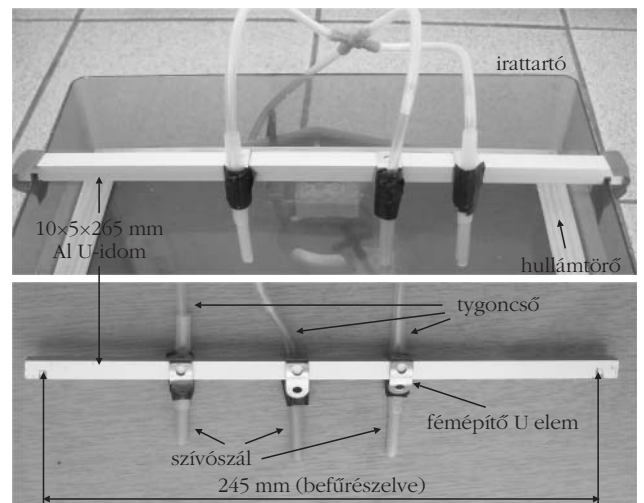
Körhullámok gerjesztése

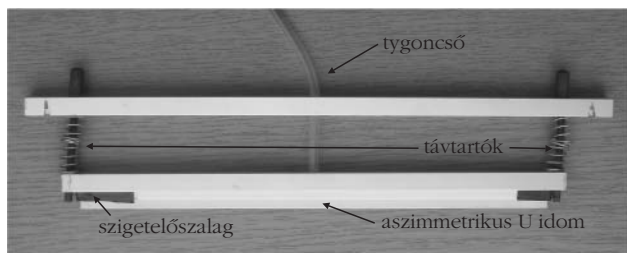
Körhullámok gerjesztéséhez a hangszóróból kivezetett tygoncső egy – az irattartóra befűrészelésekkel rögzíthető – $5 \times 10 \times 265$ mm U alakú alumínium idomhoz rögzített szívószálhoz vezet. A szívószálakat rögzítjük egy fémépítő U eleméhez, így a hullámkeltő helyzete az alumínium sínen kényelmesen változtatható (4. ábra). A szívószál(ak) hossza legyen körülbelül 3 cm, átmérőjük pedig olyan, amelyben a tygoncső könnyen mozgatható. A banánhüvelyhez és a szívószálhoz egyaránt jól illeszkedő, 4 mm külső átmérőjű tygoncsövet akvarisztikai szakboltokból szerezhethetünk be.

Síkhullámok előállítása

Síkhullámokat is előállíthatunk megfelelő hullámkeltő kialakításával. Ilyet egy műanyagból készült aszimmetrikus U elemből készíthetünk. A tygoncsövet légzáró módon vezetjük be az U idom felső részén. Az idom két végét szigetelőszalaggal zárjuk le, hogy a

4. ábra. Hullámgenerátor körhullámokhoz.





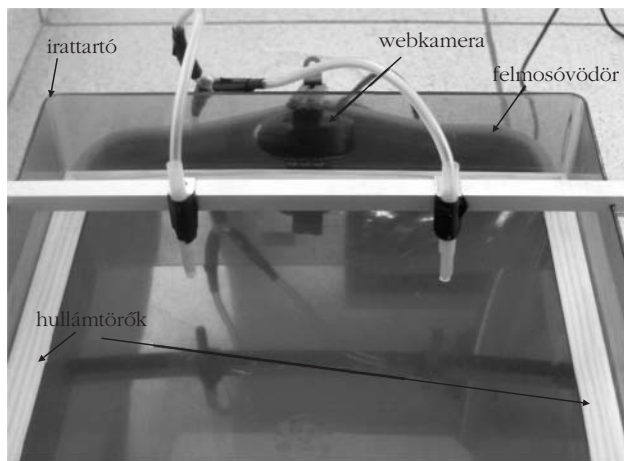
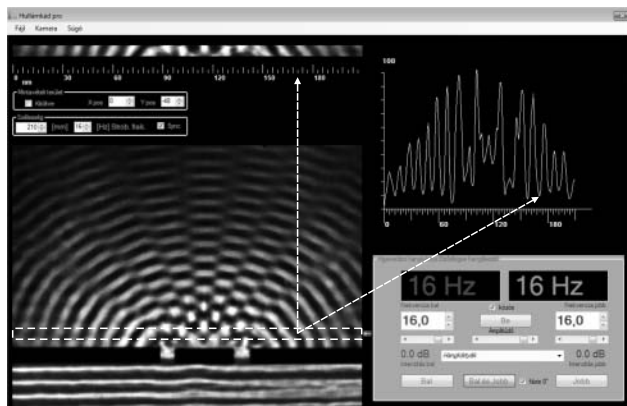
5. ábra. Hullámgenerátor síkhullámokhoz.

levegő a két végen ne távozhasson. Az állíthatóságot két, csavarra helyezett rugós távtartóval érhetjük el. A hullámkeltéskor az U idom hosszabb szára merüljön a víz alá, a rövidebb szár pedig éppen csak érintkezzen a víz felszínével (5. ábra).

Beüzemelés

Miután a fő elemeket elkészítettük, állítsuk össze a hullámkádat, majd próbáljuk ki a berendezést üzem közben. A felmosóvödörbe építsünk be egy olyan webkamerát, amely a vödör aljába helyezett papírlapot jól látja. A felmosóvödörre helyezett irattartóba töltsünk körülbelül 0,5 cm mély vizet. A tygoncső segítségével kapcsoljuk össze a rezgékeltőt a hullámgenerátorral. A hangfalakat csatlakoztassuk a számítógéphez és egy hanggenerátor program segítségével adjunk a hangfalakra 10-30 Hz frekvenciájú szinuszos jelet. Kapcsoljuk be az irattartó tálcá fölé 1,5 m magasságban elhelyezett spotlámpát. Mozgassuk addig a szívószálat, amíg a vízbe érő vége optimális hullámokat gerjeszt. Ekkor a vödör alján – szabad szemmel is jól kivehetően – megjelennek a vetített fénykörök. Ezeket a köröket a vödörbe épített webkamera segítségével kivetíthetjük egész osztálynak egy projektor segítségével. Állóképet úgy érhetünk el, hogy a webkamera képkockasebességét (frame rate) ugyanakkorának választjuk, mint a gerjesztő hang frekvenciája. A hullámok amplitúdója a hang erősségével szabályozható. Ha szeretnénk elkerülni, hogy a hullámok visszaverődjenek az irattartó faláról, építsünk be olyan hullámtörőket is, amelyek képesek megakadályozni a hullámok visszaverődését. Az összeállított hullámkád a 6. ábrán látható.

7. ábra. A program működés közben.



6. ábra. Összeállított hullámkád.

Interferencia bemutatása

Interferencia bemutatásához használjunk két szívószálat. Ezek kapcsolódhatnak ugyanahhoz a hangszóróhoz is egy Y elosztó segítségével, de kihasználhatjuk azt is, hogy a számítógépekbe sztereó hangrendszer van beépítve, így a szívószálakba egymástól független hangforrásról is juttathatunk nyomáshullámokat. A hagyományos hullámkádokban a hullámforrások független vezérlésre nincs lehetőség. Hullámkádunk működtethető a neten megtalálható szabad hozzáféréssű hanggenerátor-programokkal is, de írtam egy olyan programot, amelybe integráltam egy hanggenerátort és a webkamerás megjelenítőt. Az általam írt program azt is lehetővé teszi, hogy a webkamera képét analizáljuk. Ily módon e programmal elemezhető például két hullámforrásból származó hullámok interferenciája a hely függvényében (7. ábra).

A 7. ábrán a program ablakát láthatjuk futás közben. Az ablak jobb felső részében a hullámok amplitúdójának változása látható a webkamera képének a nyílal megjelölt helyén. A programból az interferenciaképet és az eloszlás is elmenthető, illetve megosztható a tanulókkal. Lehetőségünk van arra is, hogy egy folyamatot mentünk el egy videófájlba. Erre láthatunk példát a <http://youtu.be/FpVGMuUBeYQ> címen a YouTube videómegosztón, ahol az interferencia képének változását láthatjuk, miközben a két szívószál távolságát változtatom.

A program letölthető weblapomról: <http://pilath.fw.hu/setupok/setupwavetank2012.rar>. A program telepítése előtt telepíteni kell egy megfelelő Directx-et is <http://pilath.fw.hu/setupok/dxwebsetup.exe>. Tapasztalataim szerint ez a demonstrációs eszköz nagyon sokoldalúan felhasználható, és ami talán a legfontosabb, hogy a gyerekek is nagyon kedvelik ezt a felmosóvödörre alapozott technológiát.

Irodalom

- <http://www.physicstutorials.org/home/waves/water-waves>
- Hullámtani alapjelenségek vizsgálata hullámkád segítségével <http://fiz-kem.sze.hu/~fizlabor/hullamkad.pdf>

Gyulai József: IFJAN – ÉRETTEEN – ÉLTESSEN

80 kérdés-válasz nyolc évtizedről – Technika Alapítvány, Miskolc, 2012, 185 old.

Gyulai József tudományos önéletrajza *Tóth László* miskolci egyetemi tanárral folytatott beszélgetés alakjában készült.

Gyulai József könyve élvezetes, tárgyilagos és őszinte olvasmány. A könyvet a fejezetek sorrendjében röviden ismertetem. Könyvismertetőmben a bőség zavarával kell küzdenem: a rengeteg esemény közül csak néhányról szólok, a teljesség igénye nélkül.

Az első rész gyermekkorát tanulói befejezéséig öleli fel. Édesapja a keleti fronton Voronyezsnél tűnt el. (Ifjú koromban, az első világháború után a harcokban életüket veszítőket a társadalom hősi halottként tisztelte, gyermekei hadiárvaik voltak. Bár a második világháború után ez a felfogás megszűnt, én ma is vallom.)

Gyulainak nehéz gyermekkorra volt. A német megszállást követően, majd a háború után is üldözés várt rá. Édesanyja nevelésben mindent megadott, ami lehetséges volt, így a német nyelvet, majd az angol nyelv tanulásának megkezdését is. Hódmezővásárhelyi érettségi (1951) után Szegeden, a József Attila Tudomány Egyetemen matematika-fizika szakos tanári oklevelet szerzett (1955).

Életében fontos szerepet játszott a zene, 1949–51-ben a gimnáziummal párhuzamosan a Szegedi Zene-konzervatóriumban a zeneszerzési főiskolai szakot is végezte.

A könyv második részében munkájának kezdeti éveiről szól. 1955–56-ban tanár a hódmezővásárhelyi Bethlen Gábor Gimnáziumban. Az 1956-os forradalom leverése után *Gyászindulót* ír: a könyv CD-melléklete tartalmazza 1956-os Gyászindulóját.

1957-ben *Budó Ágoston* professzor felveszi tanszéke-re, ahol 1970-ig tanársegédként dolgozik félvezető témában: 1960-ban egyetemi doktori oklevelet szerez a JATE-n.

1958-ban házasságot köt, 1963-ban megszületik leánya.

1969-ben elnyeri a CALTECH-ösztöndíjat: 1969–70-ben az akkori szokásnak megfelelően családja itthon marad, túszként. A kaliforniai Pasadenában dolgozik, *J. Mayerrel* továbbfejleszti a Rutherford-visszaszórás (RBS), mint vékonyrétegrendszer kvantitatív elem-

zésének módszerét, amely azután helyet kapott az ISO nemzetközi szabványban. Később évente néhány hónapra visszajár a CALTECH-re és részt vesz az együttműködésben.

Hazatérése után a KFKI-ban folytatja kutatásait: témaválasztása a félvezetők ionimplantációs technológiája *Simonyi Károly* és követői nagyenergiás gyorsítóinak felhasználásával, a lehető legjobbnak bizonyult. A technológia egyes lépéseit RBS segítségével követi, amelyet a KFKI-ban lényegesen tovább fejleszt. Akadémiai doktori értekezésében már ezekről is szól. Az olvasó itt több részletet igényelne. Az RBS, valamint az ionimplantációs technológia nemzetközileg elismert eredmények. A kutatások jelenleg is folynak az MTA TTK MFA-ban. 1989-ben másodállásként tanszéket kap a Műegyetemen, ahol elődje *Gyulai Zoltán* akadémikus volt.

Az implantációs technológia bevezetésében együttműködött az akkori Híradásipari Kutatóintézetrel, a BME kapcsolódó tanszékeivel, a Műszaki Fizikai Kutatóintézetrel és a Mikroelektronikai Vállalattal.

A könyv Függelék előtti utolsó fejezete a hazai kutatás-fejlesztés, témaválasztás problémáit elemzi.

Különösen érdekes a két Függelék, Gyulai József adatainak „leltára”: családi, munkássági, oktatási, elismerési stb. adatainak és főbb eredményeinek pontos felsorolása. A Függelék II Gyulai teljes publikációs listája.

A könyvet dokumentumok, fényképek gyűjteménye zárja. A tudományos eredmények mellett szól családjáról, kedvteléseiről, a Tiszáról is.

Az életrajz lebilincselően érdekes olvasmány. Elsősorban a témában járatos kutatók, mérnökök és egyetemisták figyelmébe ajánlom, érdekes lehet azonban minden mérnök, fizikus számára, valamint egyetemre készülő középiskolásoknak is. A tématerületen nem járatos olvasók számára kívánatos lenne az RBS és ionimplantáció rövid ismertetése. Remélem, hogy sor kerül majd második kiadásra, amelyben mód nyílik a kiegészítésekre.

A könyv beszerezhető az MTA TTK MFA titkársága útján (KFKI 26 ép. telefon: 392-2224)

Gergely György

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

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

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

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

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

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

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

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

ELMŰ-ÉMÁSZ ENERGIA SULI PROGRAM ISKOLAÚJSÁG TÁMOGATÓ PÁLYÁZATA

A 2012/2013-as tanévben tovább folytatódik az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporth általános iskoláknak szóló Energia Suli programja, amely állandó elemei – így az öt éve egyedülálló sikerrel működő Fizibusz – mellett ismét különleges, jótékony célú közösségi pályázatok indít útjára.

Az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporth Energiapersely elnevezésű energiatakarékosági programja jegyében, 2006-ban indította útjára az általános iskolás diákok környezet- és energiatudatos nevelését célul tűző Energia Suli programot. Az energiatakarékosági program a lakosság szemléletformálásában, felvilágosításában kíván élenjáró szerepet vállalni, amelyhez elválaszthatatlan módon kapcsolódik *a fiatal generáció környezettudatos nevelésének támogatása* is.

Az 2012/2013-as tanév egyik újdonságaként az Energia Suli program szervezői támogatást biztosítanak az általános iskolai korosztály számára ahhoz, hogy figyeljenek, írjanak, szerkesszenek, fotózzanak, és elkészítsék saját iskolaújságjukat. Az olvasás megszerettetése, az írott szó és gondolat fontosságának hangsúlyozása – ezen célok mentén indítja el az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporth *Iskolaújság Támogató Programját*.

A programra bármely hazai oktatási intézmény jelentkezhet, ahol az általános iskolás korosztály (6–14 év) képzése folyik. Nem kell mást tenniük, mint 2012. november 19-től a program internetes oldalán, a www.energasuli.hu címen elérhető weboldalon regisztrálni. Az ott megtalálható *szoftveres felület segítségével bárki könnyedén és egyszerűen összeállíthatja az iskola saját újságját*. A szerkesztést bármikor félbe lehet szakítani, elmenteni, majd a későbbiekben folytatni. Az őszi, illetve a tavaszi félévben leggyorsabban regisztráló 100-100 iskola számára a Társaságcsoporth 500-500 példányban ki is nyomtatja és le is szállítja az iskolaújságokat – ezért érdemes sietni! Saját iskolaújságját természetesen ezen 100-100 iskolán felül is bármely intézmény éppúgy elkészítheti, hiszen a „papírmentes jövő” egyébként is az online újságírás irányába mutat. Azaz a megszületett iskolaújság elektronikus formátumban lementhető, továbbküldhető, az iskola internetes oldaláról letölthetővé tehető bárki számára, ahogy egyéni nyomtatásának sincs akadálya.

Az általános iskolák postai úton történő kiértesítése és az Iskolaújság Támogató Programra történő felhívása jelenleg is zajlik, a további részletek pedig a program internetes oldalán, a www.energasuli.hu felületen érhetők el.



Bizonyára sokak számára ismerősen cseng a Fizibusz roadshow elnevezés, amely az Energia Suli program keretében továbbra is ingyenesen áll az általános iskolák rendelkezésére az ELMŰ-ÉMÁSZ jóvoltából. A Fizibusz látogatásai során *Tóth Pál* fizikatanár látványosan és izgalmasan vezeti be a gyerekeket a fizika, azon belül is az energia világába. A busz fedélzetén folyamatosan bővülő számú demonstrációs eszköz kap helyet, amelyek elengedhetetlenek egy maradandó élményt nyújtó, rendhagyó és szórakoztató tanórához. A program sikerét jelzi, hogy a 2012/2013-as tanévben a Fizibusz betölti 5. életévét, hamarosan az 1000. iskolát is meglátogatja, így immáron 200 000 gyerekhez jut el. Az elmúlt években az általános iskolák között megtett kilométereket összeszámolva, a Fizibusz mostanra pont négyszer körbeért volna az Egyenlítő körül. A programra az ország bármely pontján működő általános iskola jelentkezhet, de arra is volt már példa, hogy egy országhatáron kívül eső, magyarok által lakott térség általános iskoláját látogatta meg a Fizibusz fizikatanára. A jelentkezési lapok letölthetőek a program internetes felületéről, a www.energasuli.hu weboldalról.

Az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporth fontosnak tartja, hogy a gyerekek már egészen korán megtanuljanak bánni az energiával, és megismerjék az energiatakarékosági módszereit. Az Energia Suli program az iskolások természettudományos ismereteinek bővítését szolgálja, amiben nagy szerepe van a tanároknak és a szülőknek is. Éppen ezért weboldaluk kialakításakor a felnőttekre is gondoltak: a www.energasuli.hu címen elérhető oldal internetes oktatójátékokkal, szórakoztató logikai játékokkal, érdekes kísérletekkel, energiatakarékosági kvízekkel és környezetbarát tippekkel várja a természettudományok iránt érdeklődő diákokat és szülőket, valamint a pedagógusukat.

KITÜNTETÉSEK

A 2012. évi Rátz Tanár Úr Életműdíj

A Magyar Tudományos Akadémián 2012 novemberében immár tizenkettedik alkalommal adták át a Rátz Tanár Úr Életműdíjakat. Az Ericsson, a Graphisoft és a Richter Gedeon Nyrt. által létrehozott Alapítvány a Magyar Természettudományos Oktatásért 2001 óta ítéli oda a Rátz Tanár Úr Életműdíjakat. Ez a díj mára a hazai természettudományos oktatás és egyben a közoktatás egyik legrangosabb elismerése lett.

A személyenként 1,2 millió forintos Rátz Tanár Úr Életműdíjat évente két-két matematika-, fizika-, kémia- és 2005 óta két biológiaszakos tanárnak ítéli oda, akik kimagasló szerepet töltenek be tárgyuk népszerűsítésében és a fiatal tehetségek gondozásában. A három vállalat ezzel a díjjal járul hozzá a magyarországi természettudományos oktatásban végzett tanári munka rangjának, erkölcsi és anyagi megbecsülésének növeléséhez.

„Hogy ne csak a világhírű tudósok, hanem tanáraik nevét is ismerjük...” – így szól a Rátz Tanár Úr Életműdíj mottója. Amikor világhírű, magyar származású tudósainkkal büszkélkedünk, kevés szó esik tanáraikról. *Rátz László* tanár úr a legendás Fasori Gimnázium tanára volt és többek között *Neumann Jánost* és *Wigner Jenőt* is tanította. Az alapítvány az ő nevét választotta, hogy adózzon nagy múltú és kiváló oktatási kultúránk előtt és méltányolja azon pedagógusainkat, akik ma is áldozatos szakmai munkájukkal és kiemelkedő eredménnyel képezik a jövő tehetségeit.

2012-ben *Kovács László* és *Ósz György* vehették át a fizikatanárokat jutalmazó életműdíjat.

Kovács László 1965-ben az ELTE-n szerzett matematika-fizika szakos középiskolai tanári oklevelet. 1965-től 1983-ig a nagykanizsai Landler, ma Batthyány Lajos Gimnáziumban tanított, majd főiskolai oktató volt 1983-tól nyugdíjazásáig (2007). Rendszeresen szervezett me-



A két frissen kitüntetett: Kovács László és Ósz György.

gyei és országos tanártovábbképzéseket. Fontos munkája a nagykanizsai Zemplén-versenyek létrehozása, szervezése. Publikációs jegyzéke több mint 300 tételt tartalmaz. Kiváló előadó; hallgatóságát magával ragadja főiskolai, tudományos és népszerűsítő előadásain éppen úgy, mint egykor a gimnáziumi fizikaórákon. Napjainkban nyugdíjasként is aktív: ismeretterjesztő, publikáló, szervező munkája jelentős.

Ósz György 1967-ben végezte el a Tanárképző Főiskolát Egerben, matematika-, fizika-, műszaki ismeretek és gyakorlatok szakon. A diploma megszerzésétől nyugdíjazásáig az Ácsi Jókai Mór Általános Iskolában tanított. Munkássága messze túlmutatott iskoláján; megyei szakfelügyelőként, szaktanácsadóként országosan is meghatározó személyisége volt a fizika oktatásának. 1974-ben alapítója volt a Komárom-Esztergom Megyei Ifjú Fizikus Tehetséggondozó Lapnak. Nevéhez kötődik az Országos Öveges József Fizikaverseny létrejötte. Több feladatgyűjtemény és szakmai kiadvány társszerzője, -szerkesztője, emellett helytörténeti kutatásokat is végez.

Kutató tanárok akadémiai elismerése

Oktató-nevelő munkája mellett jelentős tudományos tevékenységet folytató tizenhárom középiskolai tanár ünnepélyes keretek között vehette át 2012-ben is a Pedagógus Kutatói Pályadíjat. A kitüntetett pedagógusokat *Németh Tamás*, az MTA főtitkára és *Csépe Valéria* főtitkár-helyettes köszöntötte az Akadémián.

2012-ben tizenhatodik alkalommal részesültek Pedagógus Kutatói Pályadíjban az iskolai munkájuk mellett tudományos kutatást folytató, legalább öt éve oktató középiskolai tanárok. A budapesti és vidéki

iskolákból érkezett díjazottak három területen – matematika és természettudományok, az élettudományok, valamint a humán és társadalomtudományok terén – végzett kutatásaikkal érdemelték ki az elismerést.

A matematika és a természettudományok területén négyen vehették át a díjat. A Pécsi Művészeti Gimnázium és Szakközépiskolában oktató *Fükéné Walter Mária Természet-történetek. A narratívák szerepe a természettudományos megismerés folyamataiban* cí-

mű munkájáért, *Hraskó András*, a Budapesti Fazekas Mihály Általános Iskola és Gimnázium tanára *Amikor az euklideszi és a Minkowski-geometria egymásról beszélt* című pályaművéért részesült az elismerésben. *Jarosievitz Beáta*, a SEK Budapesti Oktatási Alapítvány tanára középiskolai diák-kutatócsoportokkal sikeres hazai és nemzetközi fizikai projekteket valósított meg, *Veres Gábor*, a Közgazdasági Politechnikum, Gimnázium és Szakközépiskola pedagógusa az integrált természettudományos tantárgy hatékony tanulási környezetét ismertetve írt díjnyertes tanulmányt.

Az élettudományok területéről *Krausz Krisztina*, a Garay János Gimnázium tanára vehette át a díjat.

A humán és társadalomtudományok területén nyolc pedagógus részesült az elismerésben.



Jarosievitz Beáta fizikatanár Németh Tamástól veszi át a díjat.

HIBAIGAZÍTÁS

Folyóiratunk 2012. decemberi számának 428. oldalán található fénykép aláírásában tévesen *Tófalusi Péter* szerepel.

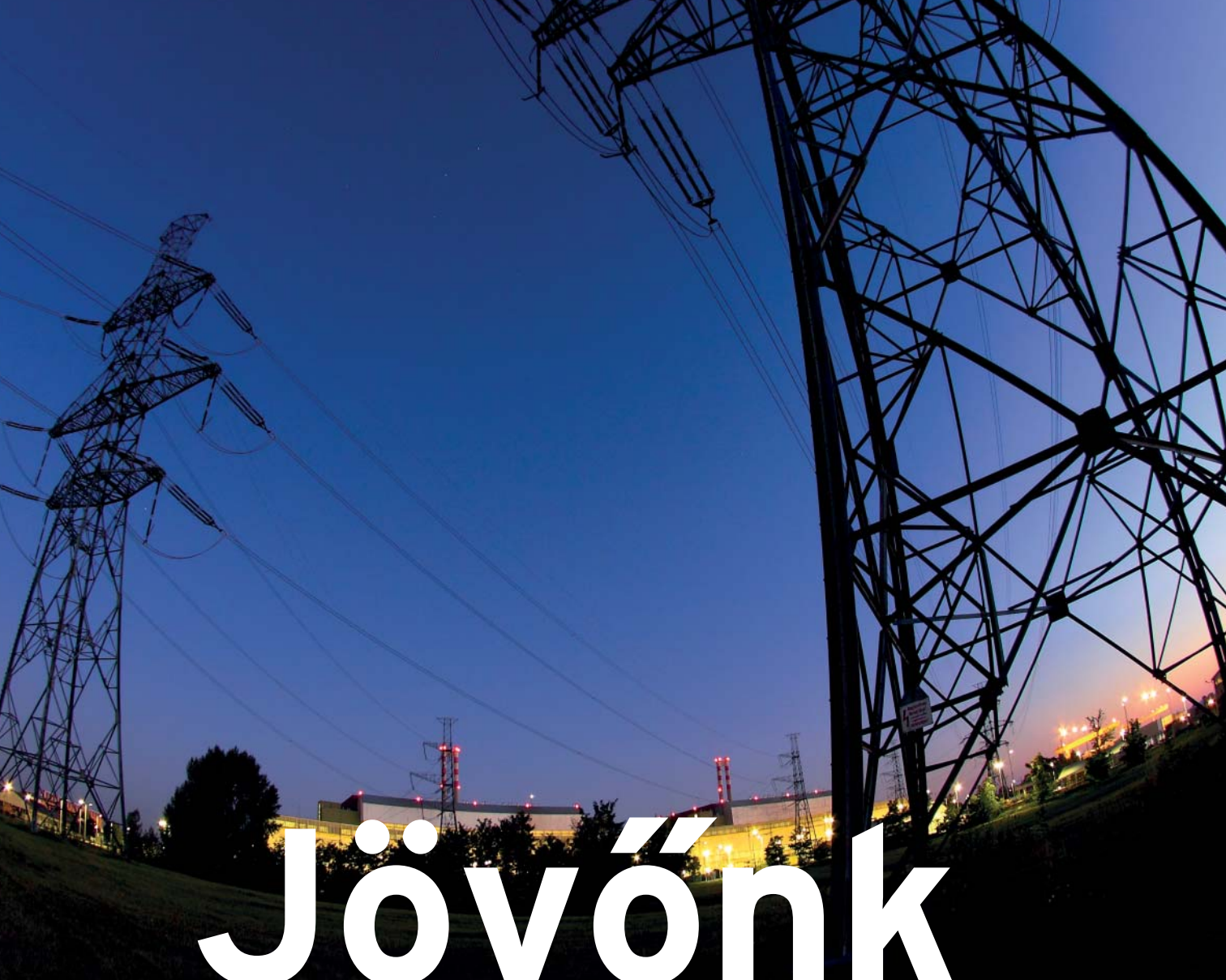
A kép alatti szöveg helyesen: *Pál Zoltán*, a Gödrei Általános Iskola fizikatanára rakétakilövés közben. A tévesztésért elnézést kérünk.

ANALEMMA FÉNYKÉPEN

A Nap éves járását mutató analemmagörbét egy fényképen megörökíteni eddig tíz asztrofotósnak sikerült. Az egy éven át tartó fotografálást plusz képfeldolgozást

is igénylő képet hazánkban elsőként *Ladányi Tamás* (www.astrophoto.hu) készített. A fotó 2010. december 31-én a Nap Csillagászati Képe volt a NASA honlapján.





Jövönk energiája



paksi atomerőmű